OS SEGREDOS DA ASTRONOMIA

OS SEGREDOS DA ASTRONOMIA

OS SEGREDOS DA ASTRONOMIA

O Céu e a Terra

TEXTOS DE:
Carla Maria Boschetti
Marie-Ange Sevin
Rosalie Fleuriot
Edição revista e corrigida por *Gerárd Oudenot*,
chefe da Seção de Astronomia do
Palácio da Descoberta

EDITIONS FERNI

Contemplando o céu

Jamais se saberá se os homens da Pré-História adoravam ou contemplavam as estrelas, à espera talvez de que uma delas caísse no chão, como haste ou corola de flor levada pelo vento.

Talvez as temessem, como a fera solitária teme o fogo, receia aquilo que não conhece e se refugia nas moitas espessas para não ver o que a aterroriza...

Pois o silêncio envolve os pensa-

mentos, as emoções de nossos ancestrais. Seus temores e alegrias permanecem para todo o sempre elementos incompreensíveis de um espaço sem ressonâncias nem dimensão.

Religião, ciência e poesia

Entretanto o céu, com seus eternos pontos luminosos, tem uma longa história para contar. História cheia de poesia e encantamentos, feita de lendas e mistério, de hipóteses e de leis matemáticas, de estudos e descobertas, de paixões e sacrifícios.

Outrora, gostava-se de contemplar as estrelas: bastava ficar-se à janela, sentar-se nos degraus de frente da casa, deitar de costas no campo ou na praia e deixar o olhar vaguear pelo infinito. Olhava-se também para as estrelas andando sobre a neve, ao longo dos caminhos por veredas cheias de pedregulho ou pela relva.

Hoje, cada um de nós, se achar em si mesmo forças para parar e escutar o

leve e inquietante sussurro do entardecer, pode ouvir suas palavras de paz. Então começa outra vez a sonhar e readquire a consciência de seu destino cósmico que engloba o futuro do homem e nossa realidade imóvel.

Galileu dizia às vezes às pessoas simples:

— Dirijo-me finalmente a ti, que não és um sábio. Já imaginaste a imensidão do universo que julgas vasto demais? E, se tu a compreendes, pensarás acaso que teu poder de compreender as coisas supera o poder divino? Porventura sonhas com obras maiores que as de Deus? E se não a compreendes, por que queres julgar aquilo que tu não conheces?

Quantos versos, quantas páginas de amor, as estrelas não terão inspirado? As preces dos homens subiram a elas e elas lhes indicaram um caminho. Cintilantes ou extintas, elas transmitiam uma mensagem, uma predição. E os homens, procurando desesperadamente interpretar sua eterna beleza, tentavam apreender verdades imutáveis, compre-

ender a criação do mundo.

Kepler, uma das grandes figuras da astronomia, escreve no fim de um livro em que, seguindo as idéias da época, divindade e ciência estavam intimamente aliadas: "Agradeço-te, ó Deus, por me haver concedido a graça de ver o que criaste. Encheste-me de júbilo. Terminei o trabalho para o qual fui chamado. Nele pus todas as forças que me deste. Pude fazer descobrir aos homens que lerão estas páginas a grandeza de tua obra ou, pelo menos, tudo que minha limitada inteligência compreendeu de teu reino infinito."

Como os povos antigos viam as estrelas

A astronomia nasceu há milhares de anos, numa época que nos deixou poucos testemunhos.

As estrelas sempre fascinaram os homens, o que explica por que essa ciência tão vasta, da que jamais será totalmente desvendada, progrediu tão rapidamente através dos milênios.

O universo é imenso demais e distante demais para que possamos segurá-lo, balizá-lo, compreendê-lo verdadeiramente. O homem já deu os primeiros passos sobre a Lua. Talvez vá um dia até Marte ou Júpiter. Mas existem milhões e milhões de corpos celestes perdidos no universo.

Nos primeiros tempos, ninguém poderia imaginar as futuras vitórias do homem. A princípio ele encontrava nas estrelas apenas um marco de referência para seus deslocamentos. Elas o guiavam. Ele implorava o auxílio delas, contemplando a noite calma e suas pulsações, seus movimentos quase imperceptíveis, suas fugas ligeiras, seus doces retornos.

Os caçadores nômades, as tribos que esperavam que o mar trouxesse o Sol à Terra, bem depressa perceberam que certos grupos de estrelas formavam determinados desenhos que eram vistos de novo todas as noites. Essas constelações pareciam descrever no céu viagens circulares. Seus movimentos se assemelhavam aos de um gigantesco reló-

gio. Então esses homens aprenderam a escutar o tique-taque dos ponteiros, a se orientar, a medir o escoamento do tempo, a fixar o começo e o fim das estações.

Assim os Fenícios compreenderam a necessidade de ter leis astronômicas para suas viagens. Baseavam-se no Sol e nas estrelas para chegar até a beira do Atlântico.

"Ao longo das costas européias, o sol do meio-dia, qualquer que seja o dia do ano, é mais baixo nos portos do norte do que nos do sul", verificavam os primeiros astrônomos. "Portanto, basta prestar atenção ao comprimento da sombra, diferente em cada ponto no mesmo momento do ano, para conhecer a posição de cada porto."

Mais tarde, observou-se que um astro podia aparecer sempre mais alto no céu ou mais perto do horizonte segundo a direção adotada; que os raios do Sol, da Lua e das estrelas formavam entre si linhas estreitas e paralelas e que, portanto, a Terra devia ser redonda e a navegação devia seguir as leis do céu.

Assim o movimento da Lua, o conhecimento de suas fases e de sua revolução mensal tinham revelado noções elementares: o mês composto de quatro semanas (porque a lunação comporta quatro fases), a primeira idéia do ano (12 lunações) e mesmo a medida do tempo graças aos calendários lunares.

No ano 3000 a.C. havia astrônomos babilônios, chineses, egípcios, fenícios e indianos. A primeira observação de um eclipse teve lugar em 2637 a.C., na China. Também lá, em 1100 a.C., foram determinadas a eclíptica e sua inclinação sobre o Equador. Quanto à divisão do dia em 12 partes, ela é anterior a 500 a.C.

Por essa época, os Babilônios observaram com precisão os eclipses e os Egípcios o ano trópico. Por seu lado, os Caldeus tinham descoberto o ciclo de saros de 18 anos e 11 dias, segundo o qual os eclipses lunares se repetem na mesma ordem.

Tinha nascido a técnica de construção dos quadrantes solares.

O homem tenta compreender o universo

Tales, Anaximandro, Demócrito, Platão, Pitágoras, Êudoxo, Aristóteles e muitos outros: quem não ouviu falar ao menos uma vez desses ilustres Gregos que marcaram o encaminhamento científico, filosófico e matemático do homem? Temos mesmo a impressão de tê-los conhecido sempre, de tê-los escutado discorrer, sob o esplendor das estrelas, sobre mundos hipotéticos povoados de estranhos seres.

A feitura de mapas já era conhecida no Egito e na Mesopotâmia, mas Anaximandro (611-547 a.C.) foi o primeiro a nos deixar uma descrição concreta da superfície terrestre. Ele introduziu o relógio solar que permitia determinar os movimentos do Sol, as datas dos dois solstícios e dos dois equinócios. E foi ele o primeiro a observar as dimensões dos corpos celestes e a distância de uns em relação aos outros. Acreditava que o Sol, as estrelas e a Lua estavam encerrados dentro de anéis

opacos e furados, girando em redor de nossa Terra, que ele imaginava chata e situada no centro do universo.

Antes dele, Tales sustentara que a Terra devia ter a forma de um disco flutuando sobre a água e que as estrelas pertenciam a uma abóbada celeste que limitava o universo. Quanto a Heródoto, afirma-se que foi capaz, depois de uma longa permanência no Egito, de predizer o eclipse do Sol do ano 585 a.C. Anaximene achava que o universo estava povoado de outros homens e de outros mundos.

Os grandes astrônomos de outrora

Mas é preciso recuar aos primeiros grandes astrônomos da Grécia que aperfeiçoaram as experiências e pesquisas das mais antigas civilizações.

A figura de Pitágoras ocupa posição de primeiro plano na apaixonada pesquisa da verdade sobre o universo, ainda que sua atitude mística tenha condicionado o método científico de

suas explorações. Como já dissemos, é difícil encontrar um astrônomo, antes do fim do século VIII, que não se tenha deixado influenciar por um profundo sentimento religioso a respeito das estrelas.

Pitágoras teve a intuição da perfeição esférica; daí, sua conclusão de que a Terra e os planetas deviam necessariamente ser redondos. Sua escola sustentou com Filolau de Tarento (480-400 a.C.) que nosso mundo não era o centro do universo: "Não é mais do que um planeta como os outros; ele gira em volta de um fogo central situado sobre a face terrestre oposta àquela em que vivemos e é por essa razão que não o vemos", afirma o discípulo de Sócrates. Fala também de um "antimundo" que equilibraria o sistema planetário.

Platão julgou a irregularidade dos movimentos planetários incompatível com a perfeição do universo. Procurou conceber tudo unicamente como o resultado de movimentos circulares. Êudoxo propôs a solução das esferas homocêntricas: todos os corpos celestes

se movem segundo um movimento uniforme, transportados por esferas cujo centro comum coincidiria com a Terra.

No século IV a.C., Calipos acrescentou outros elementos às esferas de Êudoxo. Ele havia conseguido detectar no movimento dos planetas irregularidades que ninguém até então havia percebido.

O estudo da abóbada celeste, patrimônio e privilégio, na Antiguidade, de uma elite composta de sacerdotes, filósofos e sábios, evoluiu com o passar do tempo para uma pesquisa rigorosa, matemática, ligada ou adaptada às exigências de uma linha de pensamento.

Aristóteles aceitou o dogma do círculo e da esfera como perfeição da forma. Ele concebeu o universo como uma série de esferas cristalinas, com a Terra como centro, e cuja atmosfera seria constituída por "exalações" terrestres: água, ar, fogo. O éter, substância misteriosa que o grande filósofo grego não soube descrever, era o último elemento natural. Assim giravam sete esferas que correspondiam, cada uma,

a um planeta. A oitava esfera era a das estrelas fixas.

Não nos compete pormenorizar essas teorias nem avaliar seu alcance. Quisemos somente mostrar as correntes de idéias que, desde um passado mais ou menos remoto, se interessaram pela astronomia.

O céu que nos contempla

Ao mesmo tempo que nos empenhamos em descobrir outras formas de vida, "homens" estarão talvez à escuta de nossas "vozes" e espiando-nos do céu.

Assim, desde 1931 tem-se procurado criar no espaço uma rede de antenas capazes de determinar com exatidão a posição de eventuais estações de rádio de outros planetas. Nesse ano nascia a radioastronomia, por iniciativa de um jovem pesquisador da Companhia Telefônica Bell, Karl Jansky.

Jansky fora incumbido de estudar os fenômenos de interferência que per-

turbavam as comunicações transoceânicas. Ora, essas perturbações atmosféricas lhe haviam permitido captar um ruído que parecia provir de certo ponto do espaço que nascia a leste e se punha a oeste, como o Sol. "As ondas provêm do centro da Via-Láctea", concluiu Jansky, e sua antena de rádio registrou vibrações que nada tinham a ver com a luz. As pesquisas de Jansky foram exploradas por um engenheiro de Chicago, Grot Reber.

Em 1937, Reber se pôs à escuta do universo com a antena metálica, de 10 metros de diâmetro, que construira em seu jardim. A guerra interrompeu suas experiências, mas em 1959 dois professores da Universidade de Cornell, Giuseppe Cocconi e Philip Morrison, elaboraram e aperfeiçoaram um projeto capaz de captar apelos interestelares e publicaram na revista científica inglesa *Nature* cálculos e teorias muito interessantes.

Esses dois estudiosos ficaram desapontados com o magro sucesso obtido junto ao chefe do observatório radio-

astronômico de Jodrell Bank, na Inglaterra. Mas eles não sabiam que o plano de escuta por eles concebido já havia sido elaborado nos mínimos detalhes por um jovem astrônomo eletrônico que havia respondido ao artigo de *Nature* e escrevera à revista: "Aqui é Frank Drake, de Green Bank, na Virgínia; estamos no mesmo ponto de partida." Drake estava convencido de que o universo era povoado e tinha conseguido construir uma antena de 28 metros de diâmetro para receber, em comprimento de onda de 21 centímetros, eventuais chamadas de rádio provenientes de civilizações mais adiantadas do que a nossa.

Os três homens se reuniram e prepararam o projeto OZMA, do nome da princesa da fábula *O Mágico de Oz*. Num dia de 1960, às quatro horas da manhã, apontaram as enormes orelhas metálicas de seu radiotelescópio para uma estrela que se erguia acima do horizonte, Épsilon Eridani, distante cerca de 11 anos-luz. Drake e seus companheiros esperavam captar sinais trans-

mitidos 11 anos antes e atravessando o espaço à velocidade da luz. Dias depois, os três saltavam de alegria: do cosmos vinham sinais inteligentes, talvez a primeira prova de um outro mundo. Julgaram haver triunfado. Mas logo depois vinha o desmentido: os sinais provinham... de um avião que se perdera!

Astrônomos amadores se transformam em eremitas

Nenhum observatório de rádio sobre a Terra conseguiu jamais captar sinais provenientes de emissoras construídas por seres habitantes de outro planeta. Entretanto, as pesquisas prosseguem, sustentatas por uma fé inabalável e apoiando-se, afirmam alguns, em certezas matemáticas.

A paixão pela astronomia experimenta, em alguns países, uma ascensão irresistível. Na União Soviética, por exemplo, numerosos jovens aceitam o isolamento das estações de pesquisa

nas montanhas do Cáucaso e no deserto da Sibéria. Por outro lado, os assistentes dos grandes astrônomos são em número cada vez maior.

"Olhamos as estrelas que ondulam como lagos distantes nas mais escuras profundezas", escreve Eugen Semitjov, que visitou os centros de pesquisa soviéticos e norte-americanos, "e nós nos perguntamos de que lado existem seres pensantes."

Hoje, os astrônomos pensam que nossa galáxia contém numerosos sistemas planetários: a Via-Láctea é um turbilhão de centenas de milhões de estrelas e seria bem surpreendente que outras terras povoadas não girassem em torno delas.

Carl Sagan, astrônomo, físico e geólogo norte-americano, principal artesão da sonda Mariner 9, acha que não existem homens no espaço mas sim uma vida diferente da nossa, seja mais evoluída, seja, ao contrário, de nível inferior. "O homem é único em seu gênero. As circunstâncias que determinaram sua criação não puderam repetir-

se em outra parte. Portanto, não há outros homens no universo."

Alguns estudiosos, por sua vez, sustentam que "seres dotados de inteligência podem possuir características análogas às dos humanos". E comparam o golfinho, o atum e os répteis. Frank Drake, colega de Sagan, afirma por seu lado: "Certos caracteres essenciais são inevitáveis: é preciso dois olhos para ver em três dimensões e é preciso que estejam próximos do cérebro para que a percepção luminosa siga o trajeto mais curto."

Outros ainda, como o químico sueco Gosta Ehrensvaard, se inclinam por uma total diversidade dos caracteres. Professor da Universidade de Lund, ele formula a hipótese de uma vida tecnológica e de um mundo inteligente que se estenderia por todo planeta, espécie de supersistema, usina dividida em múltiplos laboratórios. E, com imaginação, pode-se conceber bom número de outras formas de vida!

Uma forma de vida em Marte?

Na origem, não havia vida na Terra; depois, ela surgiu.

"Os homens são o fruto de acontecimentos que se produziram durante mais de 10 milhões de anos", afirma Robert Jastrow, chefe dos estudos espaciais na NASA. "Todos os planetas semelhantes ao nosso poderiam ser desprovidos de vida, varridos pelos ventos, feitos de rochas e mares estéreis... Mas as descobertas biológicas destes últimos anos provam que a vida pode aparecer espontaneamente sobre todo planeta suficientemente 'confortável' e evoluir para formas semelhantes às nossas."

Robert Jastrow acrescenta que a chave da evolução da vida universal está em Marte: "Eis por que enviamos sondas a esse planeta. Se descobrirmos que pode haver uma vida em Marte, estaremos certos de que numerosos planetas são habitados. Marte é frio, árido, mas a vida ali não é totalmente impossível."

Uma vez e meia mais distante do Sol do que nós e com um raio inferior à

metade do da Terra, Marte apareceu por muito tempo como um mundo sem vida até o dia em que, em 1971, uma sonda espacial, Mariner 9, varrendo sua superfície, fez surpreendentes revelações. Havia sobre o planeta água suficiente para que a vida pudesse desenvolver-se ali. Fendas de 3.000 metros de profundidade atestavam um passado de cheias torrenciais. Nas imagens televisadas transmitidas pela sonda divisavam-se também vulcões, vastas camadas de gelo.

"Marte de repente se tornou apaixonante", reconhecia Harold Masursky, chefe do projeto Mariner. "Essas descobertas aumentaram as nossas chances de ir um dia a esse planeta."

Hoje, os estudiosos pensam que Marte tem sua vida própria, sob formas diferentes da nossa. Infelizmente, os resultados que nos trouxeram as sondas Viking são pouco encorajadores.

O homem que abriu a estrada do céu

Aristóteles (384-322 a.C.), como vimos, acreditava que o universo era composto de esferas de cristal cujo centro era a Terra. Os elementos, o ar, a água e o fogo não passavam de exalações terrestres. A esfera das estrelas fixas completava o punhado de globos encaixados uns nos outros.

Os discípulos de Aristóteles procuraram ultrapassar esse sistema demasiado esquemático. Assim, Heráclito do Ponto afirmava que a Terra girava em redor de um eixo em 24 horas; ele fez a distinção entre o dia sideral e o dia solar e declarou que Vênus e Mercúrio giravam em torno do Sol.

"É impossível explicar a variação de brilho dos dois planetas segundo fases periódicas pela teoria das esferas homocêntricas."

Aristarco de Samos, no século III a.C., declarou que a Terra efetuava diariamente uma rotação sobre seu eixo (inclinado em relação ao plano de sua revolução anual) e que ela girava em

torno do Sol como todos os outros planetas, exceto a Lua.

As teorias desse sábio infelizmente não encontram eco antes do século XV.

De fato, na Idade Média, os monges recopiaram os textos "clássicos". Graças a eles, sabemos que Hiparco introduziu na Grécia a divisão do círculo em 360°, conhecida dos Babilônios, e que o sistema de Ptolomeu (150 d.C.), que permaneceu válido durante 15 séculos, chegou até nós através do *Almagesta*. Para Ptolomeu, todos os planetas são animados de um movimento uniforme sobre órbitas circulares cujos centros se deslocam sobre circunferências ligeiramente excêntricas em relação à Terra. A terra fica no centro do universo, no interior da órbita dos planetas, que realizam sua rotação em redor do ponto central.

Por último devemos lembrar a contribuição dada pela cultura árabe com seus astrônomos Al-Battani e Ulugh Begh, neto de Tamerlão que, no século XV, criou um observatório em Samarcanda.

Finalmente, temos o grande Copérnico e suas idéias.

O homem que abriu o universo aos homens

Uma semana antes de sua morte, Copérnico, de seu terraço na torre de Frombork, no mar Báltico, contempla o céu. Não tem certeza de poder ver a primeira edição de seu livro, o *De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI,* escrito já há vários anos. Copérnico está cansado.

"Minha vida chega ao fim. Talvez eu tenha sido prudente demais. Minhas teorias, por sua novidade, desmantelaram muita coisa. Mas talvez eu devia tê-las dado a conhecer mais cedo."

No dia 24 de maio de 1543, Copérnico morria quando um cavaleiro lhe trazia seu livro, conta a lenda.

"Esse louco pretende revolucionar a ciência demonstrando que a Terra gira em torno do Sol", havia escrito Martinho Lutero, que acrescentava: "As Es-

crituras nos ensinam que Josué ordenou que o Sol, e não a Terra, parasse."

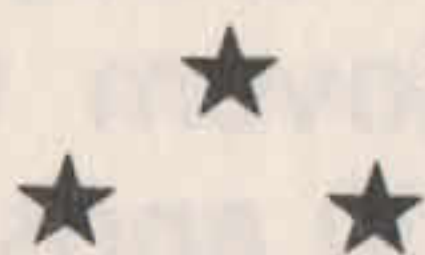
Ora, Copérnico é o fundador da ciência moderna. Foi ele que nos revelou as relações existentes entre a Terra e o Sol; a Lua e os outros corpos celestes.

Essa opinião dos astrônomos de hoje bem poderia ter servido de epitáfio para Copérnico.

Mas, em sua época, mesmo os espíritos mais científicos temiam a subversão dos princípios religiosos. A primeira voz célebre a se elevar em favor do astrônomo foi a de Goethe.

"Nenhuma descoberta, nenhuma intuição poderá jamais igualar-se à influência da doutrina de Copérnico", escreveu o poeta alemão.

★

★ ★

Copérnico nasceu em Torun, na Polônia, a 19 de fevereiro de 1473. A modesta rua que tem seu nome conserva ainda a sua casa, recentemente restaurada.

Seu pai, rico comerciante, originário da Silésia, uma das pessoas mais importantes da cidade, tinha desposado a bela Barbara Watzenrode, cuja família acumulava cargos eclesiásticos e honras civis. Nada mais natural para Copérnico do que seguir a carreira eclesiástica: seu tio Lucas escolheu para ele a escola de São João, depois a de Wloclawek, não longe de Torun.

Foi lá que o futuro Copérnico travou conhecimento com seu mestre, Wodka, que gostava de ser tratado como Astêmius e era um apaixonado pela astronomia.

"Ele passava noites inteiras contemplando as estrelas e quando elas empalideciam, de madrugada, ia se deitar, tomado de emoção", escreveria anos depois o jovem Copérnico, que ficara órfão aos 10 anos.

Seu tio, que se tornara bispo de Ermland, o adota com seus irmãos e irmãs. Aos 17 anos manda-o para a Cracóvia, então importante centro comercial e cuja universidade, de grande renome, nascera de uma velha escola

fundada por Casimiro, o Grande.

Lê-se no registro dos novos estudantes do inverno de 1491: "Nicolau, filho de Nicolau, de Torun."

Na Cracóvia, Copérnico estuda filosofia, astronomia, geografia e matemática.

Na universidade duas correntes se chocam: a dos "humanistas" alemães e a dos "escolásticos" húngaros. Cada uma defende em toda parte suas idéias — nas salas de conferência, nas estradas, ou a bengaladas. Copérnico com certeza não foi um estudante "exaltado"; se fosse, entraria em choque com a autoridade do tio.

Finalmente, volta a Torun, em 1495, sem diploma. Mas seu tio tinha um projeto. Residindo no castelo de Heilsberg, ocupava-se da catedral de Frombork e pensava em fazer nomear o sobrinho cônego do cabido.

As coisas não foram tão fáceis pois o papa queria que mandassem Nicolau a Bolonha para estudar Direito. Copérnico partiu com estusiasmo (e algum dinheiro) para a cidade que transformaria

seu futuro. A Universidade de Bolonha conserva ainda os anais intitulados *Natio Germanorum* e pode-se ler à página 141: "Dominus Nicolaus Kopperlingk de Thorn, 1496."

A universidade e a pesquisa científica

"Eu ficava horas e horas observando a Lua que passava diante da estrela fixa Aldebarã ocultando-a", escreveu um dia Copérnico.

Bolonha lhe fornecera duas coisas: o Direito e o amor pela astronomia.

Tornara-se amigo íntimo de Domenico Maria Novara, célebre professor com o qual trabalhava.

Em 1498, seu irmão, André, se junta a ele. Os dois jovens cortejam as belas damas. São vistos nas festas estudantis. Mas Copérnico não perde de vista seus estudos: pronuncia uma série de conferências sobre matemática e astronomia.

Em 1500 ele havia observado, do monte Mário, as fases de um eclipse da

Lua. E havia projetado ir a Pádua, o centro mais importante para esse gênero de estudos. Mas seu tio está vigilante e, um ano depois, os dois irmãos voltam a Bolonha.

Nicolau tenta convencer o cabido de que precisa terminar seus estudos. "Não basta cuidar das almas dos fiéis, é preciso também saber curá-las", observa ele. E o cabido concorda.

Na primavera de 1502, torna a atravessar os Alpes. Ei-lo em Pádua, depois em Ferrara: ali recebe seu diploma de "doutor em direito canônico".

Quanto a seu irmão, parte para Roma onde vai levar uma vida divertida.

Na Itália, Copérnico enriquece consideravelmente sua bagagem científica e cultural.

De novo junto ao tio, gravemente enfermo, torna-se o "anjo benfazejo" dos pobres, de seus administrados.

Em Heilsberg, apesar de todos os seus encargos, prossegue nos estudos, convencido de que somente as leis escolásticas tornam mais complexo o

acesso ao cosmos.

"É preciso transferir para o Sol a preeminência dada à Terra. Se pensarmos que o Sol é um corpo imóvel, no centro do universo, e que todos os planetas, inclusive a Terra, giram ao seu redor, tudo se torna mais simples." Copérnico começa a escrever um relatório sobre sua teoria quando o tio morre.

Anos mais tarde, seu irmão morre também, provavelmente de lepra.

Copérnico cria para si um refúgio numa das torres do castelo do tio e, durante 30 anos, ficará lá recolhendo experiências e dados de importância capital. "O Sol está no centro de tudo: ele guia a família dos astros que o cerca" (*De Revolutionibus Orbium Coelestium*). É a síntese de um pensamento apresentado somente como uma hipótese visando a facilitar os cálculos matemáticos. Pois o astrônomo sopesava cada palavra, cada descoberta. Quando, em 1514, o Papa Leão X lançou um apelo para a regulamentação do calendário (ainda se vivia sob o de Júlio César), ele se recusou a ir a Roma para

No alvorecer de sua história, a humanidade fitava o céu com olhos cheios de esperança e de temor.

encontrar os outros sábios, pois não queria um novo calendário enquanto leis precisas não definissem os movimentos do Sol e da Lua.

"Leis sobre as quais eu trabalho há muito tempo", acrescenta.

De fato, em 1582, quando Gregório XIII tornou a levantar o problema do calendário, explicaram o atraso da reforma pelas descobertas do astrônomo polonês.

Mas Copérnico estava morto há muito. Por prudência, ele havia dedicado sua obra ao papa.

Sombra e luz sobre a vida de Kepler

A obra de Copérnico não teve, no século XVI, o alcance que seus parentes lhe prediziam, pois a mentalidade medieval não podia sofrer uma reviravolta total de suas concepções astronômicas. De resto, as teorias de Copérnico precisavam ser completadas por uma observação mais precisa, para se tornarem verdades absolutas.

Depois dele, o dinamarquês Tycho Brahe concebeu um sistema planetário em que a Terra se achava no centro das órbitas da Lua e do Sol.

Brahe dirigiu durante 20 anos o observatório de Uraniborg, na ilha de Hveen, perto de Copenhague. Ele seria o mestre de Kepler. Seus métodos, a introdução do princípio da troca das esferas imutáveis (que se opunha aos princípios aristotélicos) foram o traço de união entre Copérnico e Kepler.

"Ele foi meu mestre, era como se ele me tivesse dado a vida uma segunda vez", dirá um dia Kepler.

Johannes Kepler estreou mal na vida: tinha as mãos deformadas e péssima vista! Nasceu a 21 de dezembro de 1571. Seu pai logo abandona sua mãe e os sete filhos. Kepler cresce na pobreza, em Weilderstadt, cidade de Wurtemberg.

"Aos 16 anos ouvi falar de um cometa e minha mãe me levou para vê-lo no alto de um morro. Outra vez, ela me chamou para mostrar-me um eclipse da Lua."

Aos 13 anos, o jovem Kepler se matricula no seminário de Adelberg, depois no de Maulbronn. E em 1591, recebendo o diploma de doutor em teologia da Universidade de Tubingen, aceita uma cadeira de matemática na escola protestante de Graz.

Um casamento infeliz, a morte de seus filhos minados por um mal hereditário, a pobreza, as dificuldades com a Igreja, a enfermidade: nada será poupado ao grande astrônomo até sua morte.

Em Graz, tinha escrito seu primeiro livro *Prodomus Dissertationum Cosmographicarum* e enviara um exemplar a Tycho Brahe: era o início de uma estreita e longa colaboração.

Com a morte do astrônomo dinamarquês, Kepler lhe sucedeu como matemático imperial no observatório de Praga.

Corre o ano de 1601. Kepler poderia levar ali uma vida tranqüila e folgada. Mas em Praga sempre o pagam com atraso e ele precisa endividar-se para sustentar a família. Além do mais,

sente-se doente: "Pertenço à categoria de pessoas que, presas da enfermidade, não sobrevivem por muito tempo"

Entretanto, continua a trabalhar. Atrai contra si a hostilidade de grande parte do clero e é excomungado no decurso do Concílio de Stuttgart. Tinha fugido da Áustria por ser um país protestante. Ei-lo agora banido pelos católicos!

Kepler tem de abandonar seu cargo no observatório de Praga sem ter recebido um centavo. Única nota mais suave em sua vida atormentada: a estima de Galileu que lhe oferece um óculo-de-alcance e com quem mantém freqüente correspondência.

Em sua *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*, Kepler tinha sustentado que os quatro satélites de Júpiter, descobertos por Galileu, não existiam. Com honestidade e fervor, corrigirá o próprio engano.

★

★ ★

Em 1600, o tribunal da Inquisição condena à morte Giordano Bruno, célebre filósofo italiano: Bruno é acusado de sustentar a pluralidade dos mundos! Galileu fica humilhado. Como esperar que Kepler possa aceitar um cargo na Itália? Entretanto, em 1617 lhe oferecem a cátedra vaga de seu amigo Giovanni Antonio Nagini, matemático bolonhês.

"Seria para mim uma grande alegria e honra suceder a ele, mas sou alemão e receio não poder aclimatar-me na Itália. Além disso, meus alunos não me entenderiam e não me apreciariam."

Em Weilderstadt, onde nascera, ainda se fazia a caça às bruxas. Sua mãe teria sido queimada viva, não tivesse seu célebre filho intervindo: a acusada, comparecendo perante o tribunal com uma defesa redigida pelo filho, foi salva. Mas o episódio tinha durado quatro anos e Kepler saiu dele cheio de mágoa.

Nesse meio tempo, a Santa Sé publicara um decreto proibindo a leitura

das obras de Copérnico.

Em plena campanha contra Galileu, Kepler publica o *Harmonices Mundi* e tem o cuidado de enviar uma carta a todos os livreiros estrangeiros: "Declaro que sou cristão e fiel à doutrina católica."

Mas a Igreja rejeita as hipóteses sobre o movimento do Sol e da Terra e veta energicamente Copérnico.

"Vocês, livreiros, procurem vender meu livro às mais altas autoridades, aos mais eminentes filósofos, para que eu, advogado de Copérnico, possa estar à altura deles. E assim eles poderão estabelecer se estas descobertas são o fruto de uma imaginação transbordante ou se elas são o resultado de pesquisas na natureza a partir de fatos concretos", escreve então Kepler. A Guerra dos Trinta Anos assola a Europa. Em 1626, Kepler tem de deixar Linz sitiada e refugiar-se em Ulm.

Morreu quatro anos depois, às portas de Ratisbona: viera pedir à Dieta que interviesse a fim de que seus venci-

mentos de "matemático imperial" lhe fossem pagos. Tivera de vender seu muar para pagar um médico!

Carla Maria BOSCHETTI

A Terra, nosso planeta

A Terra no espaço

A Terra é o terceiro planeta do sistema solar a partir do Sol e o maior dos quatro primeiros chamados planetas telúricos. Esses quatro planetas se assemelham pela densidade média:

Mercúrio	5,4
Vênus	5,2
Terra	5,5
Marte	3,9

e pelo tamanho (o diâmetro da Terra é tomado como unidade):

Mercúrio	0,38
Vênus	0,95
Terra	1
Marte	0,53

Particularidade notável da Terra é possuir ela um satélite relativamente volumoso, a Lua, que é de natureza análoga à dos planetas vizinhos (diâmetro igual a 0,27 do diâmetro terrestre, densidade: 3,4).

Em todos os tempos, o homem se interessou pelos fenômenos celestes impressionantes ou familiares. Por isso bem cedo tratou de representar para si o universo que o circunda: suas representações são então míticas. No curso dos primeiros milênios antes de nossa era, os Caldeus consideravam que a Terra era achatada, limitada em extensão e em profundidade; eles a mostram flutuando sobre a água, encimada por uma abóbada à qual estão afixadas as estrelas.

Para os Egípcios, a Terra é um deus deitado, chamado Keb, coberto de vegetação. Sobre ele se ergue, graciosamente curvada, a deusa do céu sustentada pelo deus do ar. O deus Sol representado nas duas barcas solares vaga durante o dia através do céu e à noite se recolhe ao reino da morte.

As doutrinas hindus são várias. Uma tribo acreditava, por exemplo, que a Terra era sustentada por elefantes cujos movimentos provocavam os tremores de terra. Os paquidermes se mantinham de pé sobre uma tartaruga, encarnação do deus Vishnu...

Centenas de séculos decorreram assim antes que o homem suspeitasse a forma e a grandeza do mundo em que vivia. É preciso aguardar a época grega e Anaximandro (século VI a.C.) para que surja a noção da Terra isolada no espaço.

Não se fala ainda numa esfera, e sim num cilindro, de altura igual à terça parte do diâmetro, e do qual somente a parte superior é habitada.

É com Parmênides, no início do

século V, que nasce a idéia de uma Terra esférica, após observação dos eclipses da Lua. Essa idéia se impôs a seguir no curso dos séculos, entre outras coisas pelas viagens sobre a superfície da Terra.

Foram certamente as noções de Terra isolada e esférica no espaço que representaram as duas etapas essenciais.

Outra etapa, transposta muito mais tardiamente, é a que tirou a Terra do centro do universo para ali colocar o Sol. Copérnico escreve que é preciso tratar a Terra "de modo que ela possa ser considerada como um dos corpos celestes". A importância dessa revolução de idéias é enfatizada pelas resistências que suscitou. O homem teve certa dificuldade em admitir que a preeminência que, a seus olhos, lhe confere a faculdade de pensar não se traduzisse na posição que ocupa no universo.

Forma e dimensões da Terra

A primeira medição do raio de nosso planeta coube a Eratóstenes, no século III a.C. (Fig. 1).

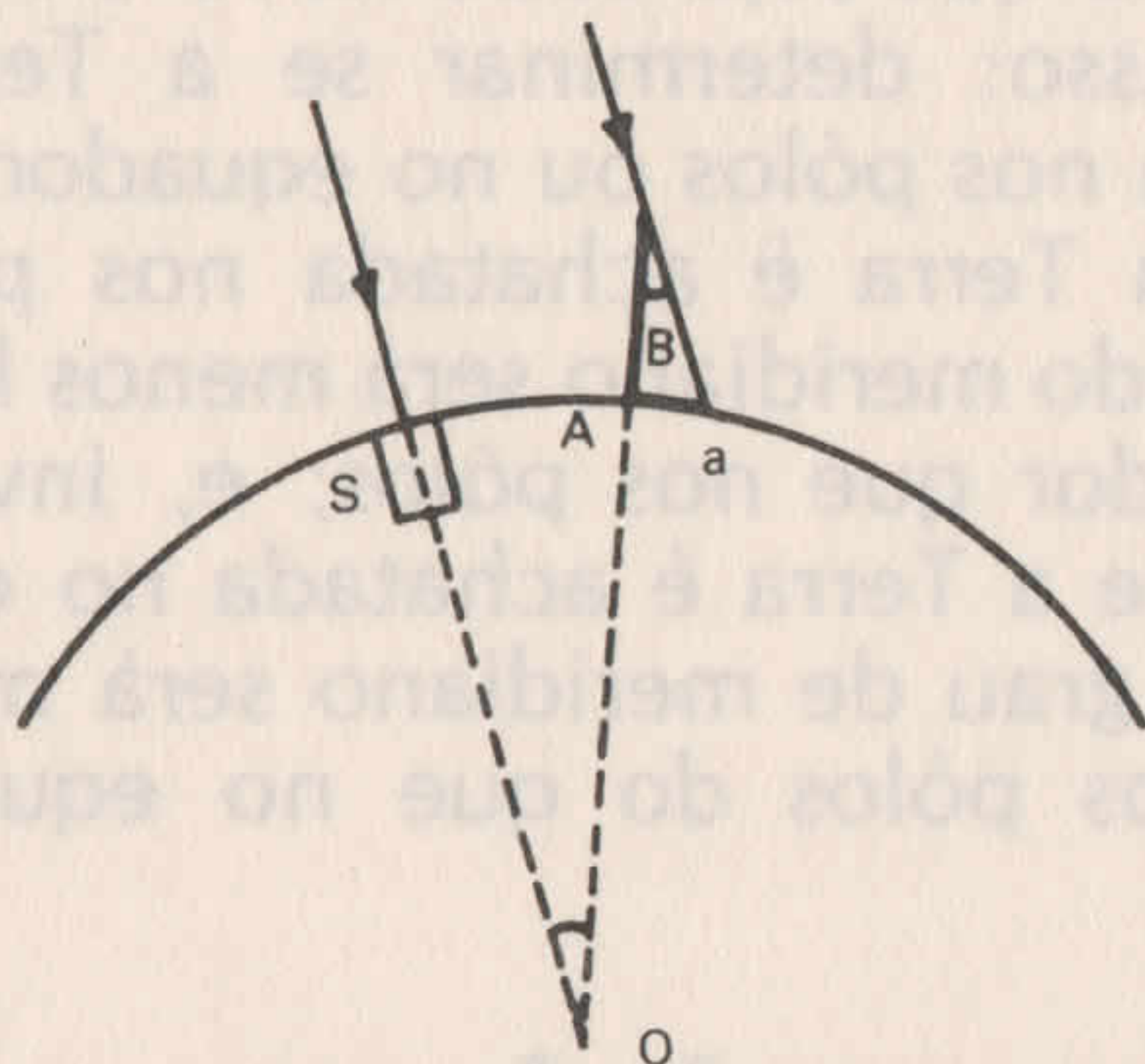



FIG. 1 — PRINCÍPIO DA MEDIDA DO RAIO TERRESTRE.

Em Siena (hoje Assuã), no dia do solstício de verão (21 de junho), o Sol se reflete no fundo de um poço, vertical no momento de sua culminação. A medida da sombra de um obelisco na Alexandria, no mesmo dia (Aa) e o conhecimento da distância que separa Ale-

xandria de Siena (SA), fornecem o valor procurado. Somente se reteve o princípio que determinou a medição, já que o resultado que chegou até nós é muito controvertido.

É preciso esperar o início do século XVIII para que seja dado novo e importante passo: determinar se a Terra é achatada nos pólos ou no equador.

Se a Terra é achatada nos pólos, um grau do meridiano será menos longo no equador que nos pólos; e, inversamente, se a Terra é achatada no equador, um grau de meridiano será menos longo nos pólos do que no equador. (Fig. 2)

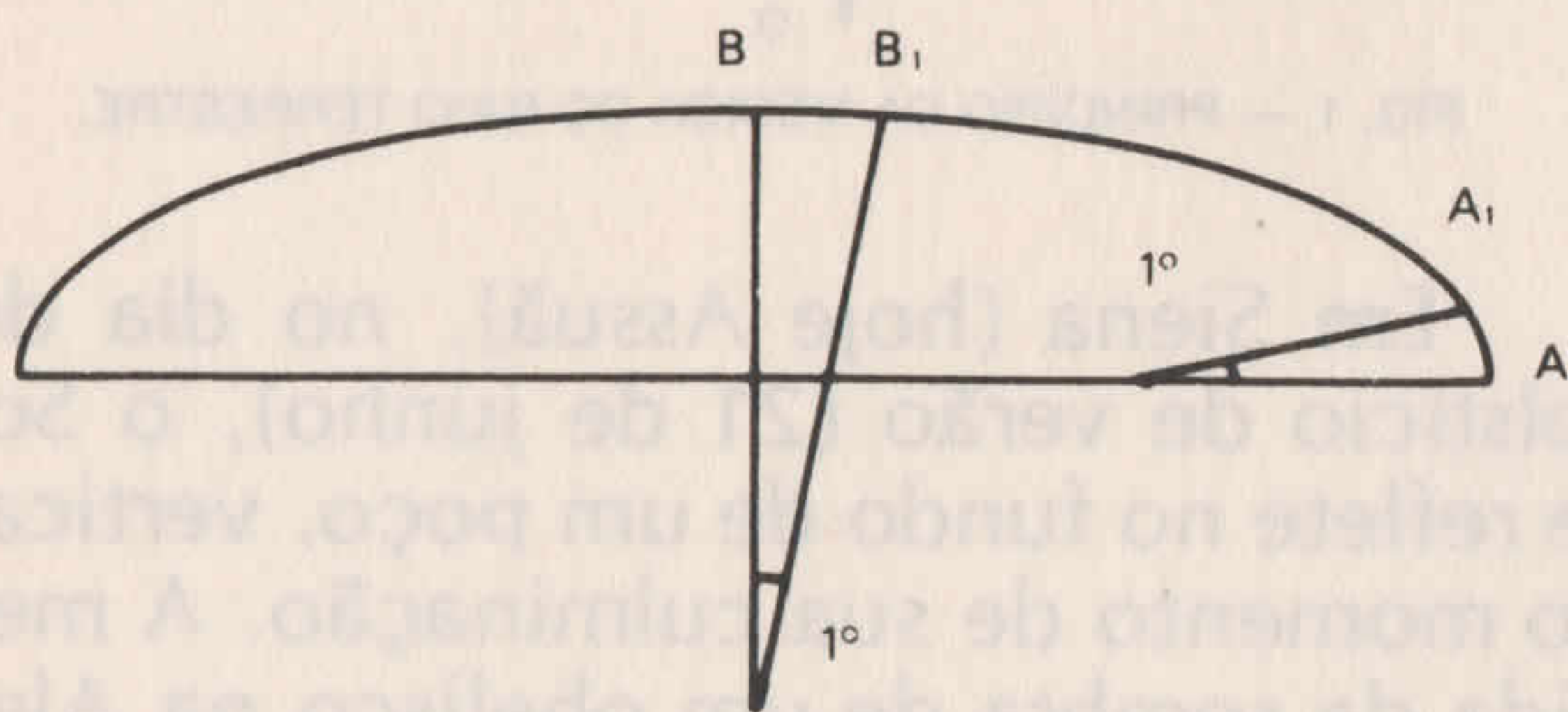



FIG. 2 — VALOR DO GRAU DO MERIDIANO, EM LUGARES DIFERENTES.

Para saber, era necessário levantar as medidas. Uma medição efetuada por Jacques Cassini, em 1718, tinha levado a concluir pelo alongamento da Terra segundo o eixo polar. Newton, ao contrário, queria que ela fosse achatada segundo esse mesmo eixo. Essa disputa entre cassinianos e newtonianos culminaria com o envio de duas missões: uma, dirigida por Maupertuis assistido por Clairaut, mediu um arco meridiano na Lapônia (1736-1737); a outra, formada por Bouguer e La Condamine, fez o mesmo no Peru (1735-1744).

Os resultados deram razão a Newton: o arco de 1º de comprimento de 57.420 toesas na Lapônia não tinha senão 56.750 toesas no Peru!

À parte irregularidades da superfície que são de pouca importância, admite-se que a Terra é um sólido de revolução. Além disso, um meridiano terrestre tem a forma de uma elipse cujo pequeno eixo é a linha dos pólos — a Terra é, pois, um *elipsóide de revolução*.

Em 1924, o astrônomo norte-ame-

ricano Hayford propôs os números que foram adotados para definir o elipsóide internacional. (Fig. 3)

A = SEMI-EIXO MAIOR
B = SEMI-EIXO MENOR

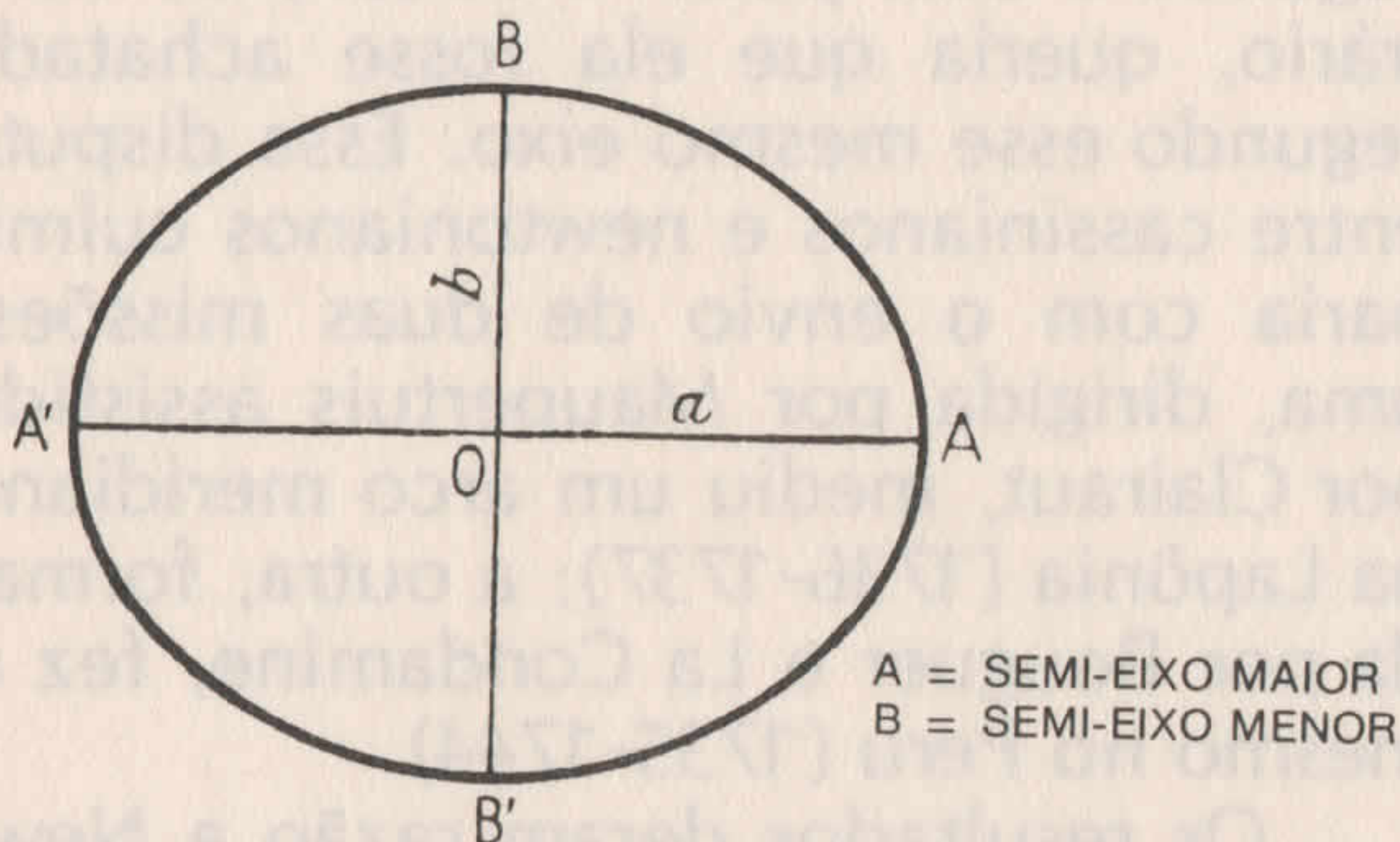



FIG. 3 — A FORMA DA TERRA.

a = 6.378.388m
b = 6.356.912m

A relação $\alpha = \dfrac{a - b}{a}$ se chama achatamento; ela vale $\alpha = \dfrac{1}{297}$.

Hoje, o achatamento é obtido diretamente pela observação dos planos das

órbitas dos satélites artificiais, o que dá os resultados seguintes:

a = 6.378.160m
b = 6.356.774m

$$a' = \frac{1}{298,25}$$

Os diferentes movimentos da Terra e suas conseqüências

Esses movimentos são numerosos. Citemos na ordem de importância: a rotação da Terra sobre si mesma; a revolução da Terra em torno do Sol; a desigualdade mensal do Sol, devida ao fato de que é o centro de gravidade Terra-Lua que se desloca em torno do Sol e não a Terra somente; a precessão dos equinócios e a nutação devidas à dilatação equatorial.

A Terra gira sobre si mesma em torno de sua linha dos pólos em 23 horas e 56 minutos. Esse movimento que se efetua de oeste para leste acarreta um *movimento aparente* do céu

dirigido de leste para oeste e do qual uma volta é completada evidentemente em 23 horas e 56 minutos. Esse movimento tem o nome de *movimento diurno*.

A Terra se desloca numa elipse de excentricidade 0,0167, da qual o Sol ocupa um dos dois focos (primeira lei de Kepler). O semi-eixo maior dessa elipse que é por definição *a unidade astronômica de distância* mede .... 149.600.000 quilômetros.

Esse movimento em redor do Sol se efetua em um ano, do que resulta um movimento aparente anual para o Sol dirigido de oeste para leste. (Fig. 4)

O plano dessa elipse é chamado *plano da eclíptica*. Por volta de 2 de janeiro, a Terra está no *periélio*, isto é, o mais perto do Sol, à distância de 147.100.000 quilômetros, enquanto que em 5 de julho, ela se encontra no *afélio*, a uma distância de 152.100.000 quilômetros aproximadamente.

O movimento exato é calculado pelos métodos da mecânica celeste, por meio de formulários estabelecidos por

O astrônomo grego Ptolomeu, cujo sistema cósmico se imporia durante mais de um milênio.

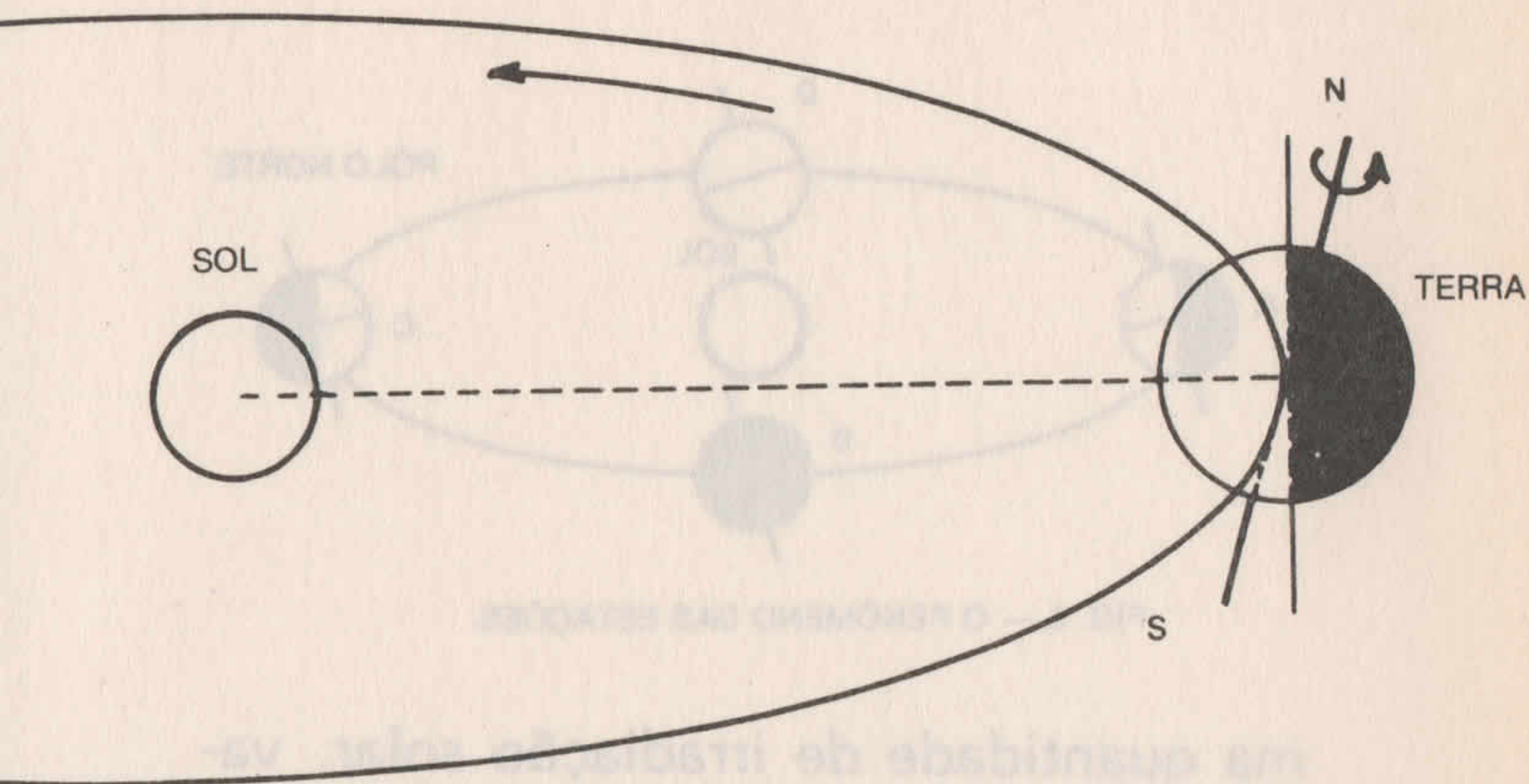



FIG. 4 — OS DOIS PRIMEIROS MOVIMENTOS DA TERRA.

Le Verrier e Newcomb.

O fenômeno das estações resulta da inclinação do eixo da Terra sobre o plano da eclíptica. Esse eixo faz um ângulo de 23°27′ com a perpendicular ao plano da eclíptica; além disso, conserva uma direção fixa no espaço. (Fig. 5)

Assim, no curso de um ano, uma dada região da Terra não recebe a mes-

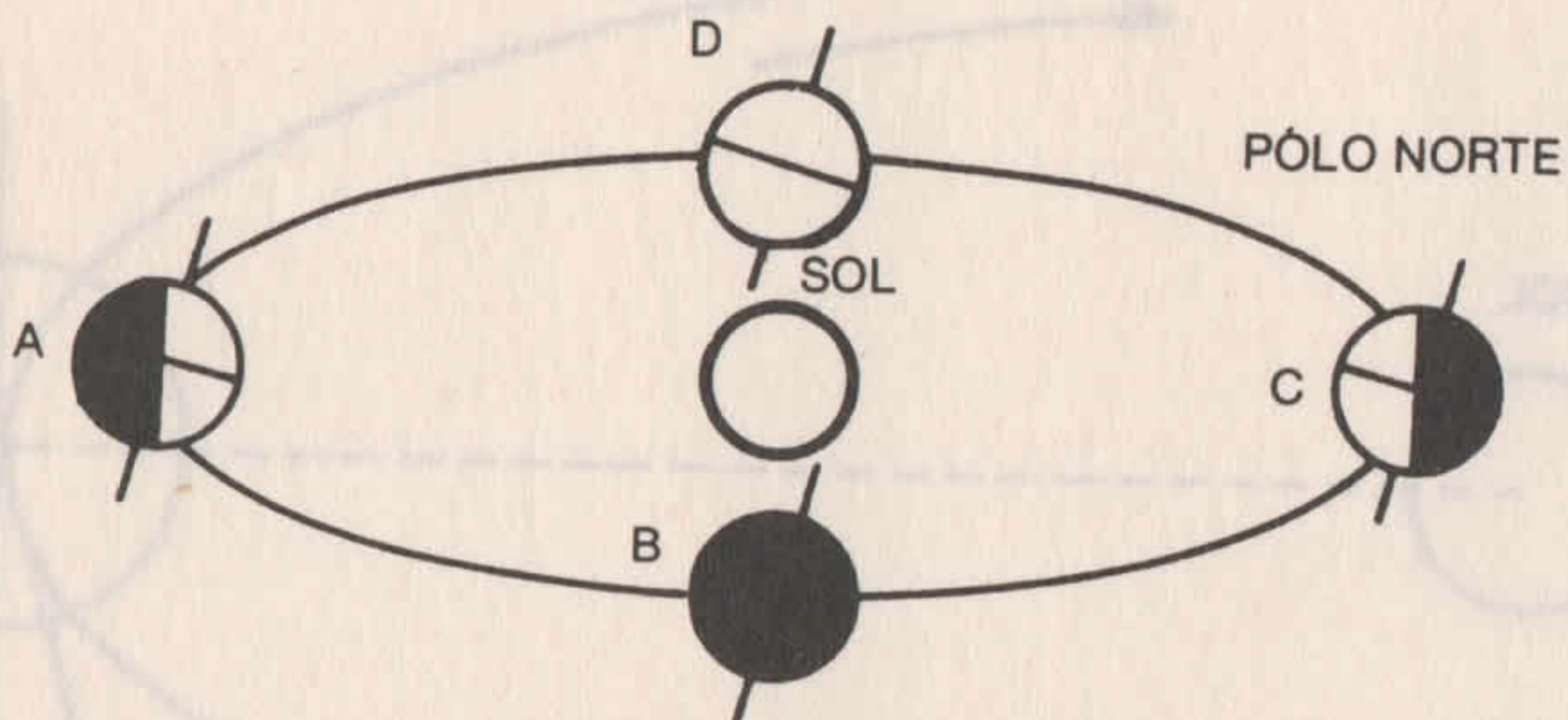



FIG. 5 — O FENÔMENO DAS ESTAÇÕES.

ma quantidade de irradiação solar, variando os tempos de insolação e os raios solares atingindo a Terra segundo diferentes incidências. É esse fenômeno que leva o nome de *fenômeno das estações*. (Fig. 6)

O começo de cada estação é definido por um fenômeno astronômico: solstício para o verão e o inverno, equinócio para a primavera e o outono.

Para definir esses dois termos, vamos considerar, de uma parte, o *plano P* contendo o eixo polar e perpendicular ao plano da eclíptica e, de outra parte,

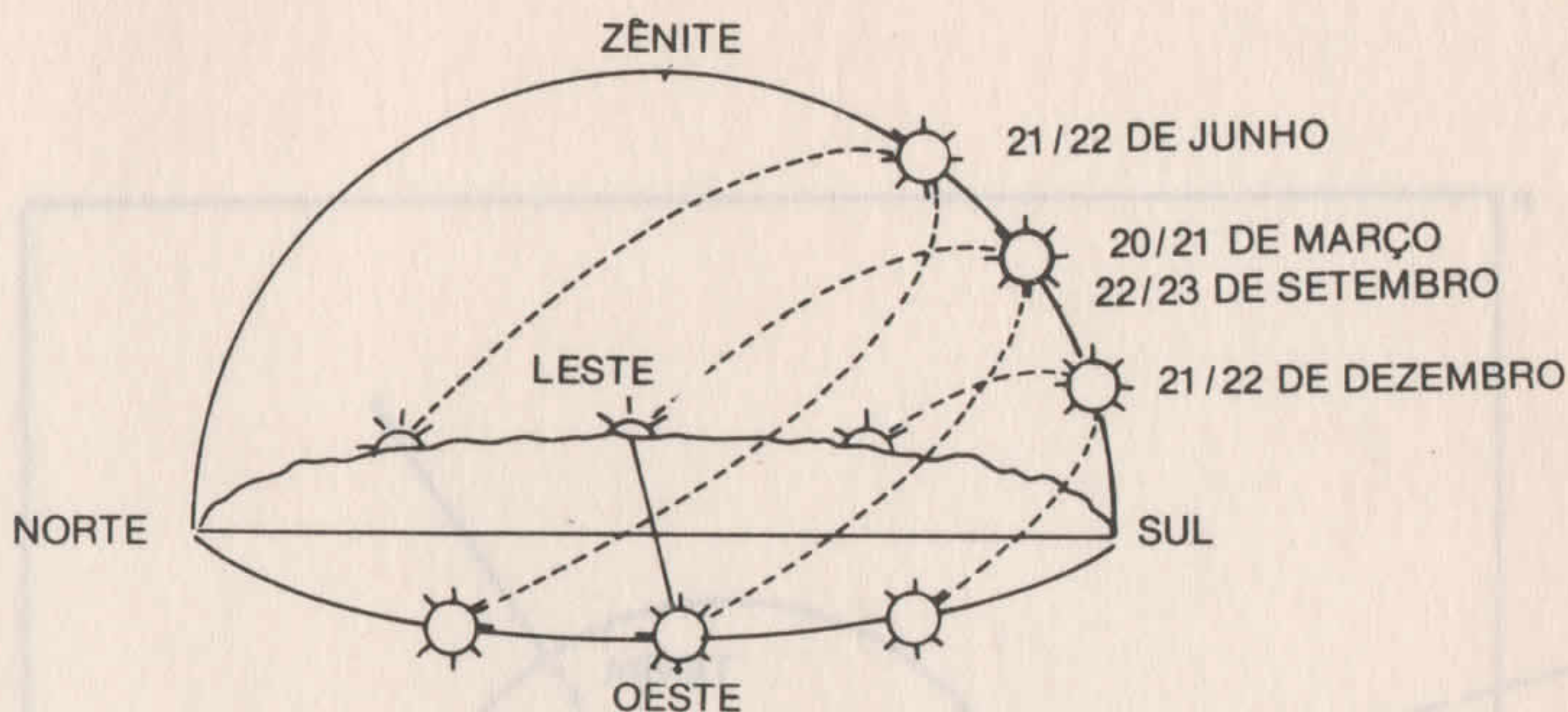



FIG. 6 — TRAJETO APARENTE DO SOL NAS DIVERSAS ESTAÇÕES, NA FRANÇA.

o segmento que une o Sol e a Terra, o *raio vetor*. (Fig. 7)

Quando o raio vetor está perpendicular ao plano P, é um equinócio; nessa época, para todos os pontos da Terra, o dia e a noite têm a mesma duração.

Ao contrário, quando o raio vetor se acha no plano P, é um solstício. Advirta-se que não é no solstício de verão que o Sol sobe mais alto no céu, como acreditam muitos; na realidade, isto é verdade nas latitudes, mas falso entre os trópicos. Solstício vem do la-

P

TERRA

RAIO VETOR

SOL

PLANO DA ECLÍPTICA

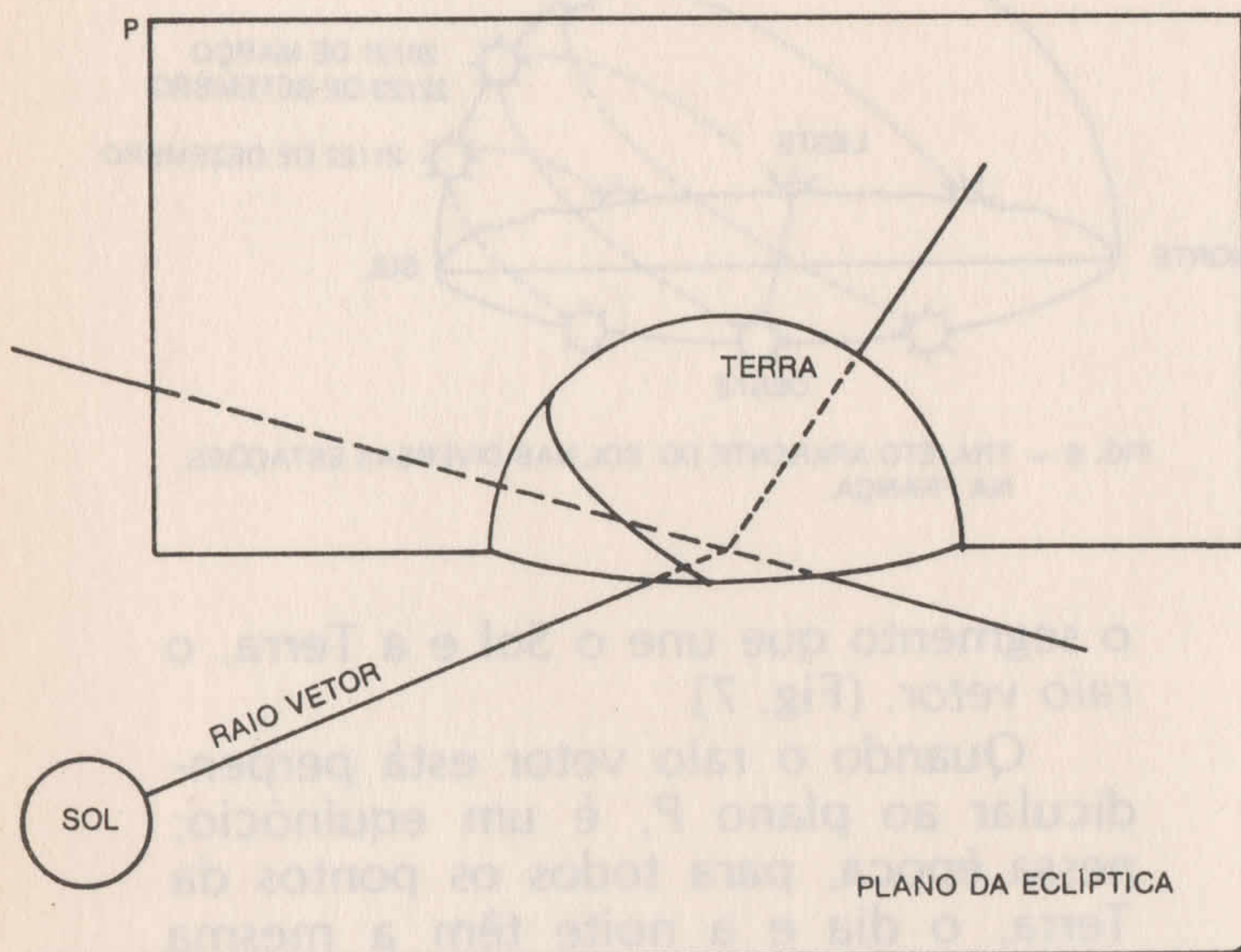



FIG. 7 — EXPLICAÇÃO DOS SOLSTÍCIOS E DOS EQUINÓCIOS.

tim *solstitium*, que significa "parada do Sol".

Nos dias que precedem e seguem o solstício, o Sol sobe aproximadamente à mesma altura no céu.

Eis, para o hemisfério norte, as datas do começo das estações:

Primavera: 20 ou 21 de março.
Verão: 21 ou 22 de junho.
Outono: 22 ou 23 de setembro.
Inverno: 21 ou 22 de dezembro.

Desigualdade das estações

Sabemos como se efetua o movimento de translação da Terra em volta do Sol. A segunda lei de Kepler indica que a Terra vai percorrer sua órbita a uma velocidade variável: o raio vetor Sol-Terra varre superfícies iguais em tempos iguais. (Fig. 8) Quando o planeta se aproxima do Sol, ele se desloca

P = PERIÉLIO
A = AFÉLIO
$A_1 = A_2$ LOGO $T_3 - T_2 = T_1 - T_0$

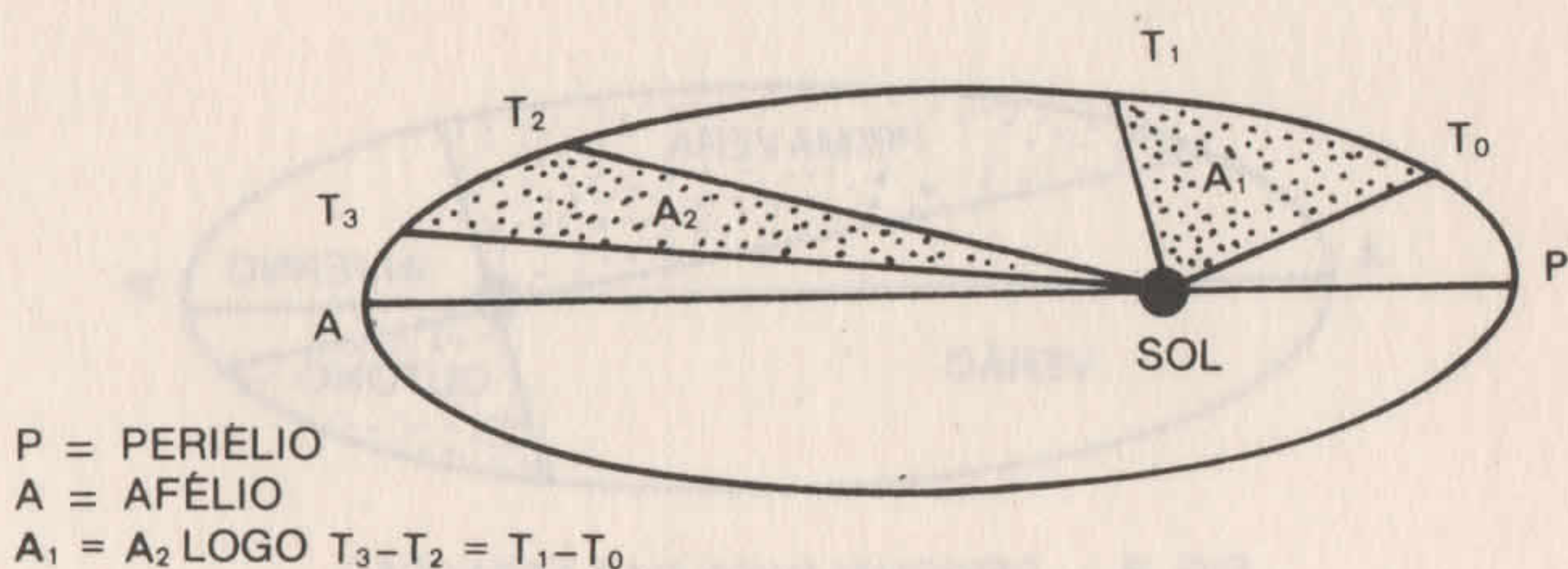



FIG. 8 — A SEGUNDA LEI DE KEPLER.

mais depressa e, ao contrário, desacelera ao se afastar. Isso nos mostra que não pode haver igualdade de duração entre as diferentes estações.

Quando a Terra passa no periélio, é o começo do inverno no hemisfério norte; portanto, inverno e outono serão estações mais curtas nesse hemisfério; ao contrário, a primavera e o verão serão mais longos. (Fig. 9)

Como a órbita terrestre é pouco achatada (a excentricidade é igual a 0,0167), serão registradas diferenças de somente alguns dias.

Primavera	92 dias e 20 horas
Verão	93 dias e 15 horas
Outono	89 dias e 19 horas
Inverno	89 dias

FIG. 9 — DESIGUALDADE DAS ESTAÇÕES.

O dia solar e o dia sideral (Fig. 10)

A Terra gira sobre si mesma em 23 horas e 56 minutos, o que quer dizer que, ao fim desse tempo, um ponto de

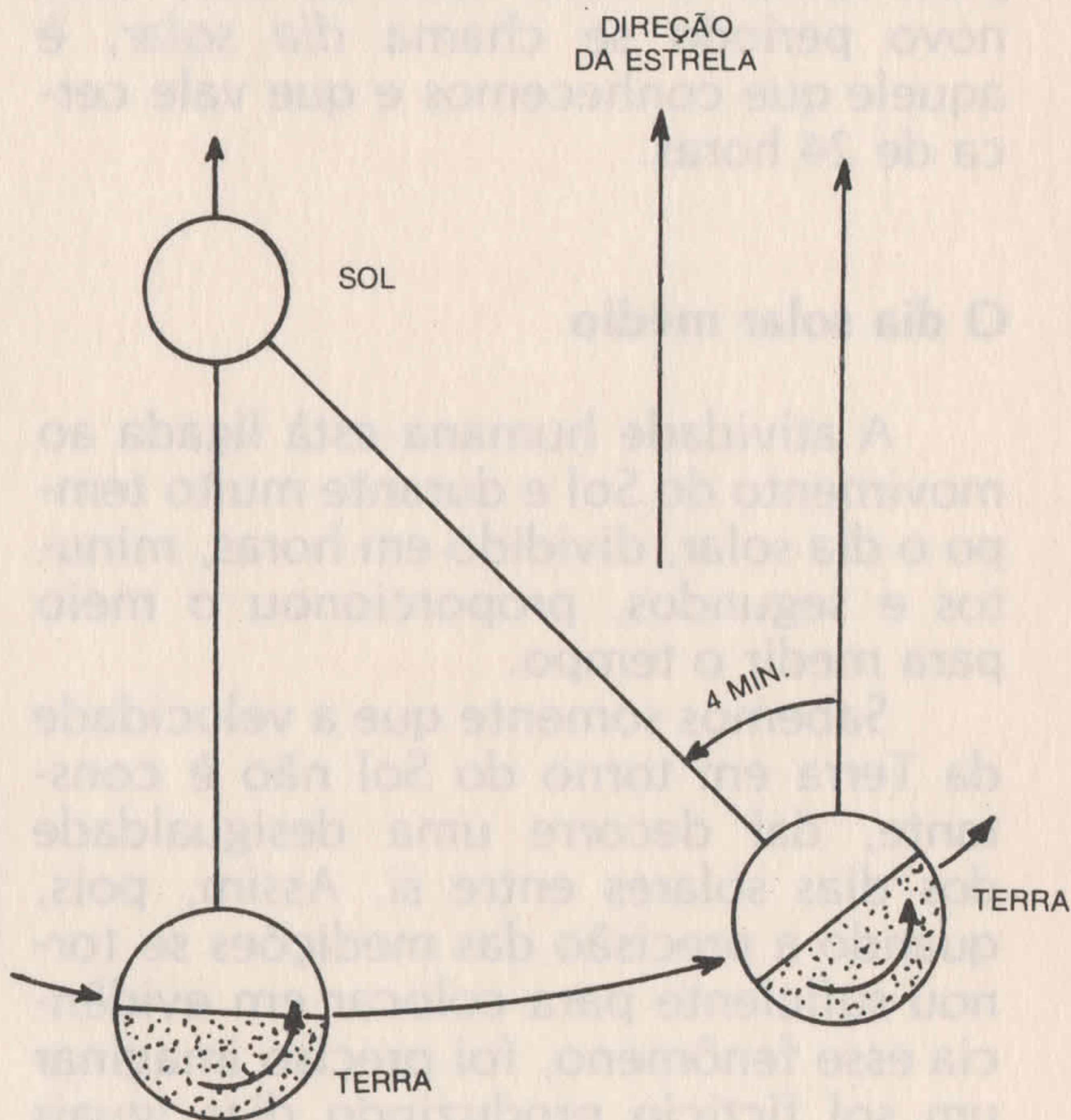



FIG. 10 — A DIFERENÇA ENTRE O DIA SOLAR E O DIA SIDERAL.

nosso planeta torna a fazer face a uma mesma estrela; é o *dia sideral*. Durante essas 23 horas e 56 minutos, a Terra se deslocou em redor do Sol, terá pois de girar mais um pouco sobre si mesma para tornar a fazer face ao Sol; esse novo período se chama *dia solar*, é aquele que conhecemos e que vale cerca de 24 horas.

O dia solar médio

A atividade humana está ligada ao movimento do Sol e durante muito tempo o dia solar, dividido em horas, minutos e segundos, proporcionou o meio para medir o tempo.

Sabemos somente que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante, daí decorre uma desigualdade dos dias solares entre si. Assim, pois, quando a precisão das medições se tornou suficiente para colocar em evidência esse fenômeno, foi preciso imaginar um sol fictício produzindo dias iguais entre si ao longo de todo o ano. Esses

dias de 24 horas são os dias solares médios; divididos em 86.400 partes, fornecem *o segundo de tempo médio*.

A diferença entre o tempo solar verdadeiro e o tempo solar médio tem o nome de "equação do tempo". (Fig. 11)

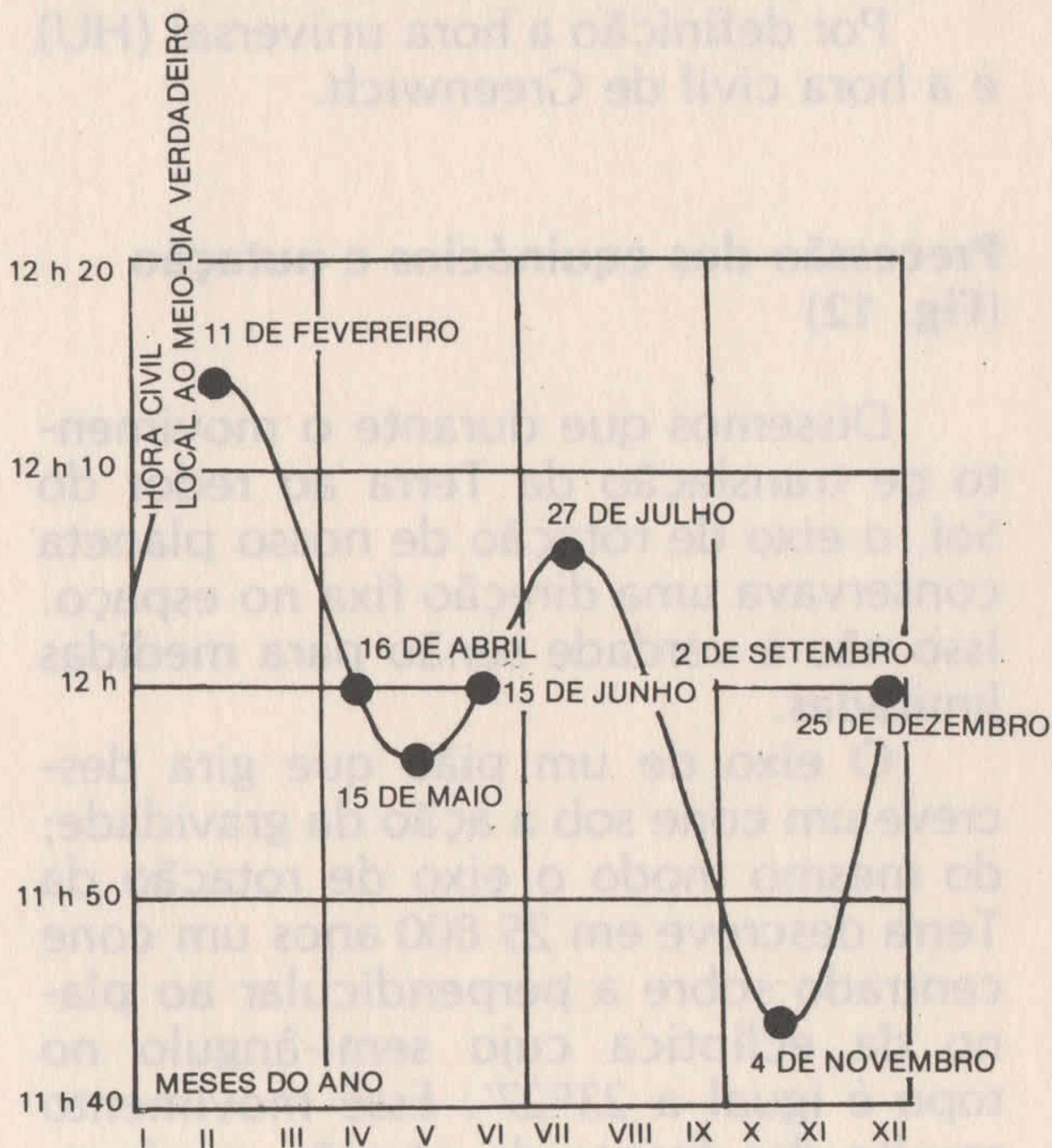



FIG. 11 — A EQUAÇÃO DO TEMPO.

O tempo universal

A hora solar média é contada a partir do meio-dia; chamamos de hora civil de um lugar o tempo solar médio desse lugar acrescido de 12 horas.

Por definição a hora universal (HU) é a hora civil de Greenwich.

Precessão dos equinócios e nutação (Fig. 12)

Dissemos que durante o movimento de translação da Terra ao redor do Sol, o eixo de rotação de nosso planeta conservava uma direção fixa no espaço. Isso não é verdade senão para medidas limitadas.

O eixo de um pião que gira descreve um cone sob a ação da gravidade; do mesmo modo o eixo de rotação da Terra descreve em 25.800 anos um cone centrado sobre a perpendicular ao plano da eclíptica cujo semi-ângulo no topo é igual a 23°27'. Esse movimento resulta das forças de atração conjuga-

CONE DE PRECESSÃO

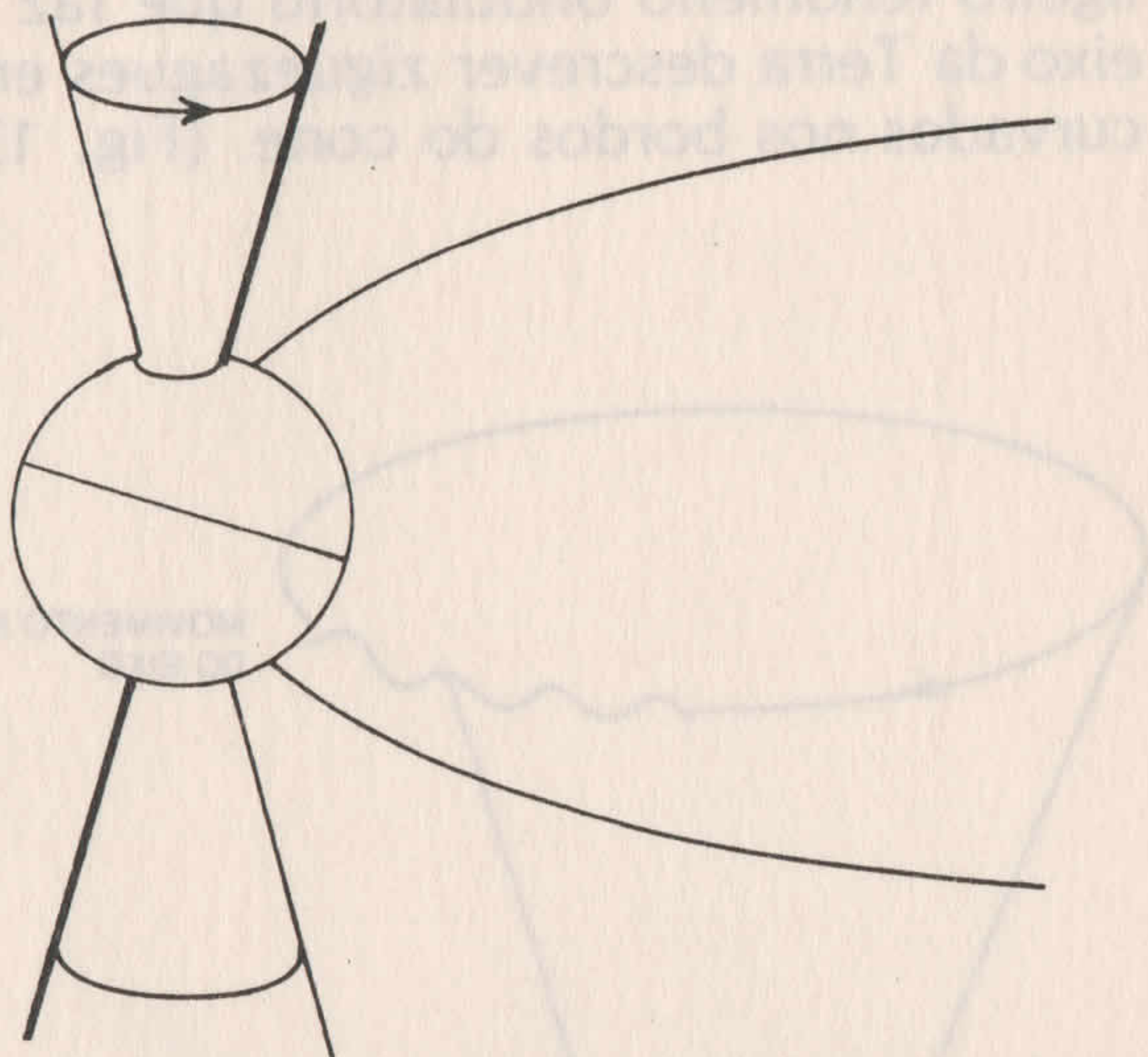



FIG. 12 — A PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS.

das do Sol e da Lua; é o fenômeno geral de *precessão*. Assim, a direção do pólo celeste Norte, atualmente próxima da estrela Polar, estava distanciada 9° dela há 2.000 anos. Estará próxima da estrela Vega daqui a 11.000 anos.

Esse movimento pode ser desmembrado em duas partes: a precessão pro-

priamente dita e a *nutação*, que é um ligeiro fenômeno ondulatório que faz o eixo da Terra descrever ziguezagues encurvados nos bordos do cone. (Fig. 13)

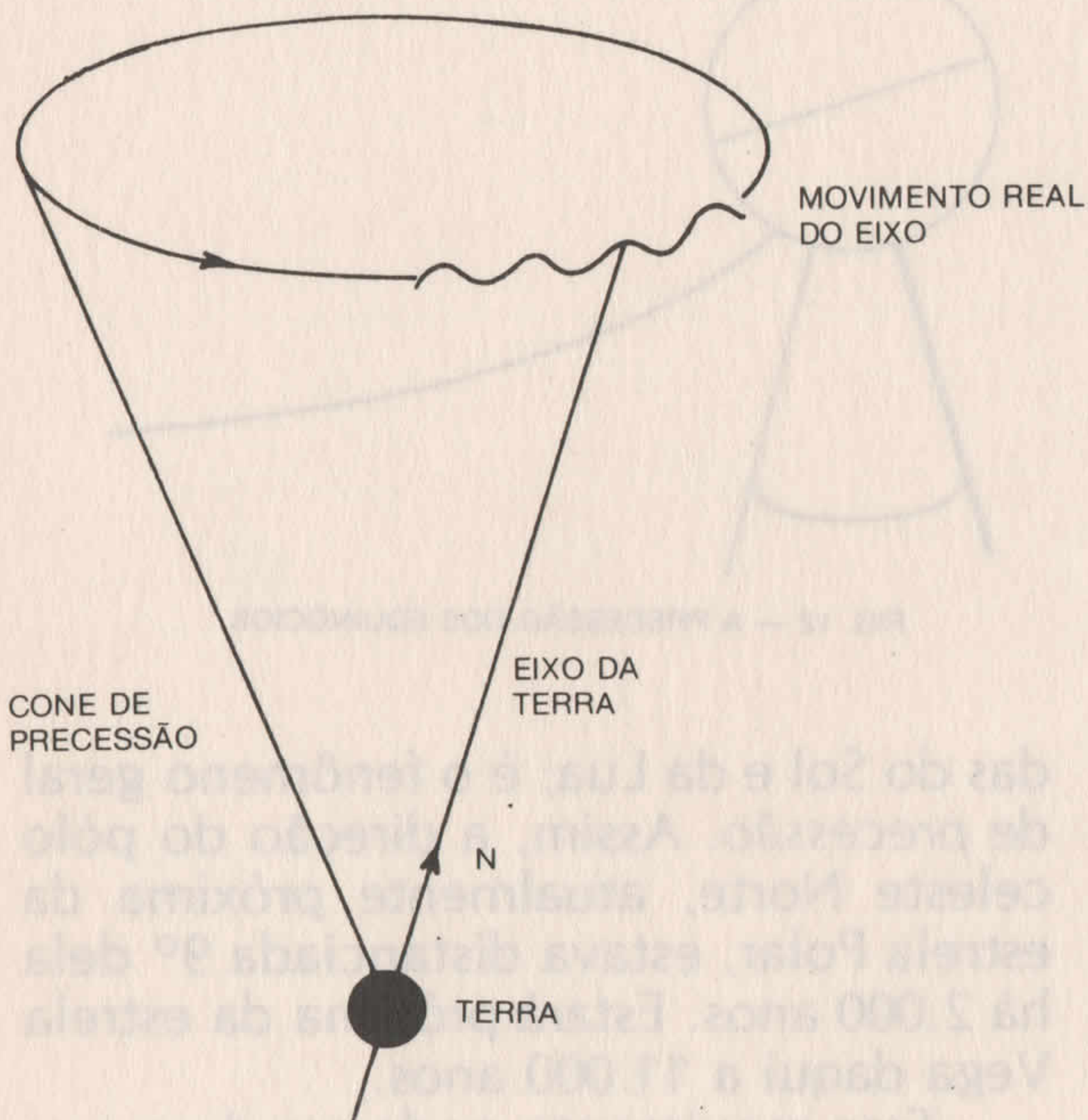



FIG. 13 — O MOVIMENTO DE NUTAÇÃO

As coordenadas terrestres

O movimento de rotação da Terra sobre si mesma permite definir pontos de referência em sua superfície. Os pólos são os pontos fixos, eles nos dão duas direções essenciais: o norte e o sul. O plano perpendicular à linha dos pólos, no meio desta, corta a Terra segundo um grande círculo, o equador, que a divide em dois hemisférios: o hemisfério norte ou boreal e o hemisfério sul ou austral.

Os planos paralelos ao plano do equador demarcam os *paralelos*.

Se fizermos um plano passar pelos dois pólos, este reparte a superfície terrestre segundo outro grande círculo: é um *meridiano*. Esse meridiano, girando ao redor da linha dos pólos de oeste para leste, circunda a Terra em 23 horas e 56 minutos.

Podemos determinar a posição de um ponto da superfície terrestre por duas coordenadas: *a latitude* e *a longitude*. (Fig. 14)

Zonas geográficas: quando o Sol

EQUADOR

MERIDIANO

MERIDIANO

EQUADOR

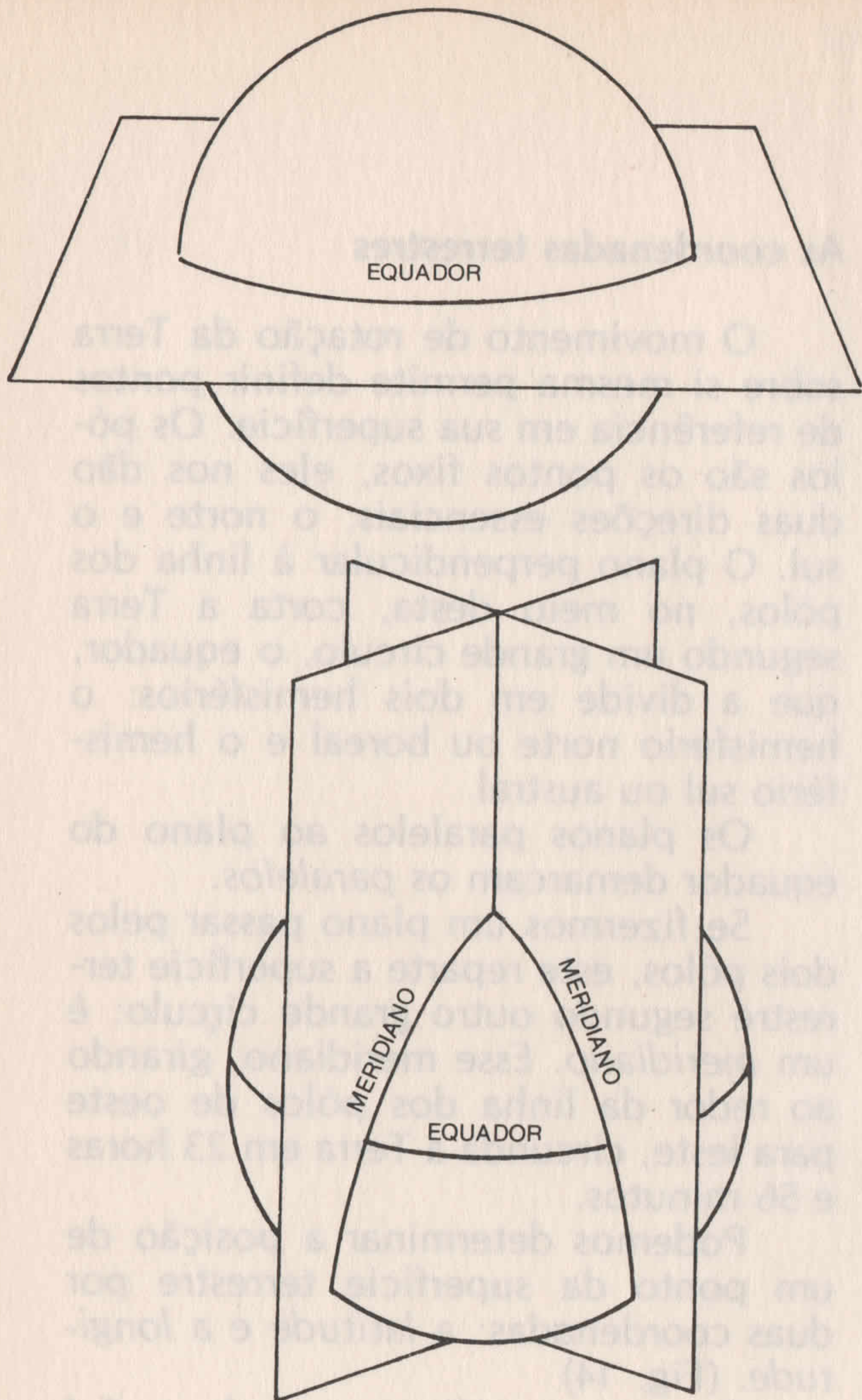



FIG. 14 — ELEMENTOS GEOGRÁFICOS.

atinge a declinação de +23°27′, ele se encontra no zênite quando passa no meridiano do ponto A que tem precisamente essa latitude.

O conjunto dos pontos da Terra para os quais o Sol passa no zênite no dia do solstício de verão é o paralelo de latitude 23°27′ norte. Ele é chamado *trópico de Câncer*. Os pontos de latitude 23°27′ sul formam o *trópico de Capricórnio*. O Sol passa no zênite desses pontos no solstício de inverno.

Nesse mesmo solstício de inverno, o Sol fica no horizonte do ponto B cuja latitude é 66°33′ N, complemento de 23°27′, pois o horizonte de B está então paralelo ao raio OA′. O Sol, portanto, é circumpolar durante uma parte do ano, para todos os pontos que têm uma latitude superior a 66°33′ N ou inferior a 66°33′ S. Os círculos que têm essas latitudes são os *círculos polares*. (Fig. 15)

Caracteres da superfície terrestre

A superfície do globo representa

B
CÍRCULO POLAR
ÁRTICO (66° 33′ N)
TRÓPICO DE CÂNCER
A
(23° 27′)
O
TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO
A
CÍRCULO POLAR
ANTÁRTICO

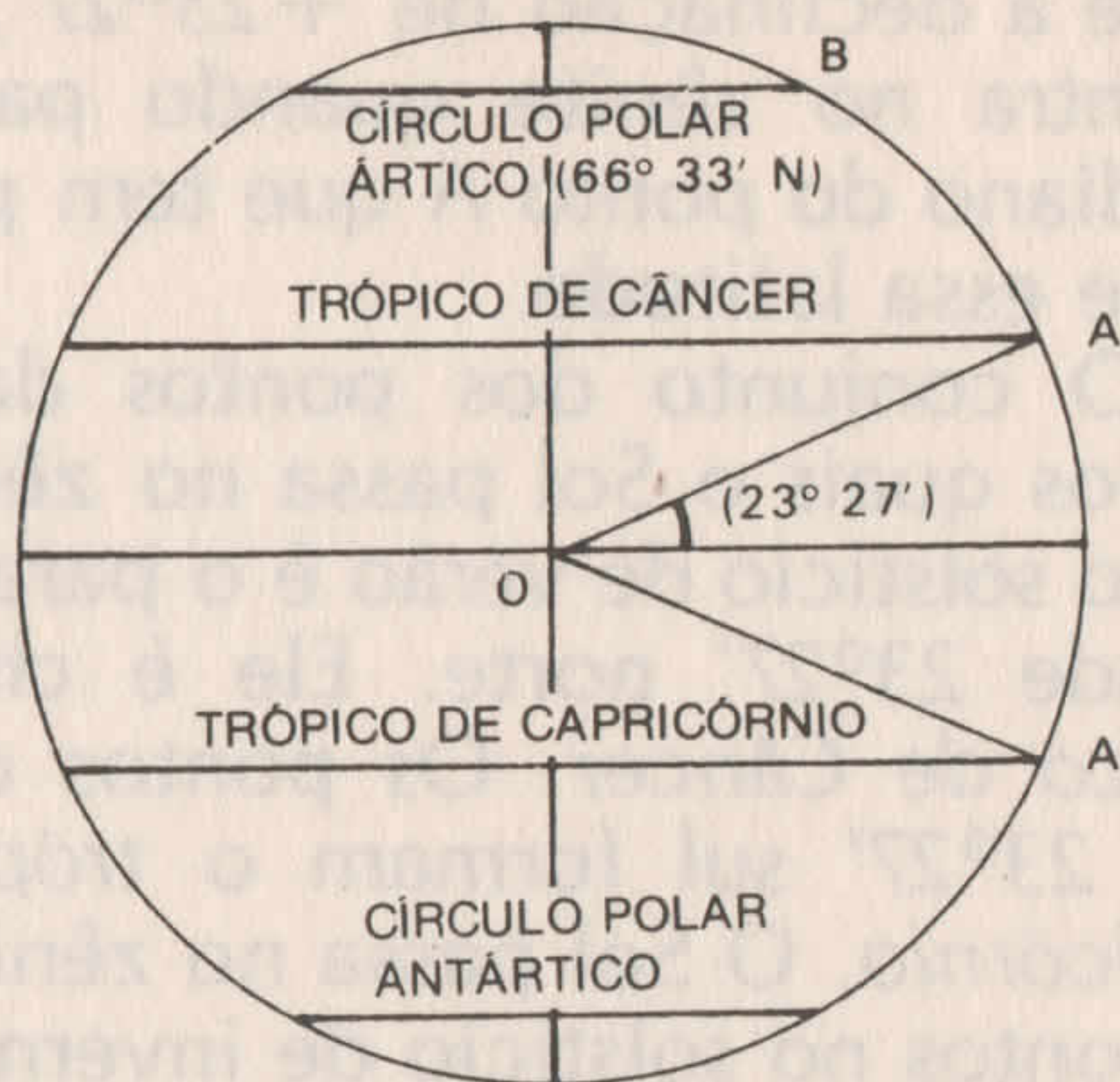
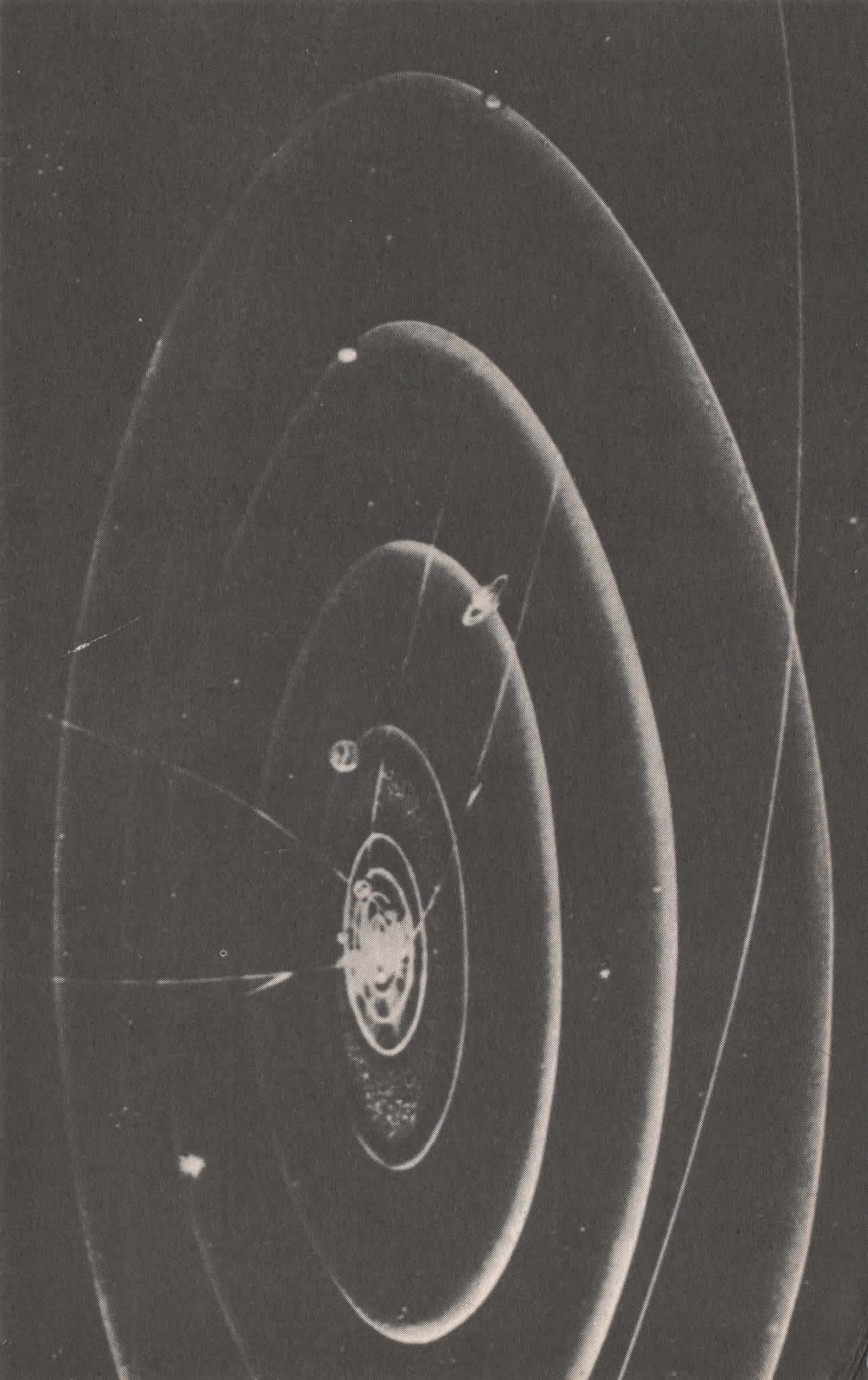



FIG. 15 — CÍRCULOS POLARES E TRÓPICOS.

510 milhões de quilômetros quadrados. A superfície dos continentes atinge 148 milhões de quilômetros quadrados (ou seja, 29,2%) e a dos oceanos 362 milhões de quilômetros quadrados (ou seja 70,8%).

As tabelas que seguem reúnem os dados mais recentes e dão uma visão de conjunto da configuração terrestre.

A essas considerações, é preciso acrescentar que 80% da superfície dos continentes estão situados no hemisfé-

A Terra, pequenino planeta no meio de numerosos outros.

Continentes	Superfície (milhões de km²)	Porcentagem da superfície total dos continentes	Porcentagem da superfície do globo
Eurásia	55,0	36,8	10,8
África	30,6	20,5	6,0
América do Norte	22,0	14,8	4,3
América		26,8	7,8
do Sul	18,0	12,0	3,5
Antártica	15,6	10,5	3,1
Austrália e Oceania	6,8	5,4	1,6

rio norte e centrados na Espanha; e que 89% da superfície dos oceanos se acham no hemisfério sul e centrados na Nova Zelândia.

Para descrever a superfície da Terra com mais precisão devemos distinguir duas unidades estruturais principais: as plataformas continentais e os pisos das bacias oceânicas a que se juntam as margens continentais e as rugas oceânicas.

As diferentes posições das linhas das praias não correspondem ao limite

Oceanos	Superfície (milhões de km²)	Porcentagem da superfície total dos oceanos	Porcentagem da superfície do globo
Pacífico	181,3	50,1	35,4
Atlântico	94,3	26,0	18,4
Índico	74,1	20,5	14,5
Ártico	12,3	3,4	2,4

entre as unidades estruturais pois existem, por um lado, margens continentais imersas (cerca de 25%), e por outro lado zonas oceânicas emergidas como a Islândia (no total de menos de 1%).

A tabela seguinte nos dá uma idéia mais precisa da repartição das diversas unidades estruturais.

Escudo é uma vasta unidade geomorfológica que apresenta uma topografia de planícies e planaltos. Os escudos constituem parte importante da superfície dos continentes. Sua estrutura associa a socos muito antigos, com mais de 2,5 bilhões de anos de idade, vestígios mais ou menos importantes de coberturas sedimentares de idades diversas.

	Superfície (milhões de km²)	Porcentagem da superfície total dos continentes	Porcentagem da superfície do globo
Continentes	148,0	19,7	29,2
Escudos antigos	29,4	19,7	5,8
Plataformas continentais	66,9	44,9	13,1
Zonas orogênicas			
Primárias	24,4	16,4	4,8
Secundárias / Terciárias	28,3	19,0	5,5
Margens continentais	55,4	15,3	10,9

Uma *margem continental* é uma zona de largura variável que representa a transição entre o continente propriamente dito e o piso oceânico.

Constituição da Terra

Um estudo da repartição dos diferentes constituintes da crosta terrestre

	Superfície (milhões de km²)	Porcentagem da superfície total dos oceanos	Porcentagem da superfície do globo
Oceanos	362,0		70,8
Pisos oceânicos profundos	151,5	41,8 } 74,5	29,7 } 52,9
Dorsais e rugas	118,6	32,7	23,2
Crosta oceânica	19,2	5,3	3,8
Arcos insulares e fossas	6,1	1,7	1,2
Ilhas oceânicas	5,7	1,6	1,2
e outras elevações	5,4	1,5	1,1

nos revela que, entre todos os elementos conhecidos na superfície da Terra, os mais abundantes são apenas um número muito restrito deles.

Eles estão representados na tabela abaixo, segundo os estudos de Clarke e Washington (1924), de um lado, e Mason (1966) de outro.

Óxidos		Átomos			
Porcentagem em peso		Porcentagem em peso		Porcentagem em volume	
SiO_2	59,12	O	46,60	O	93,80
Al_2O_3	15,34	Si	27,72	Si	0,80
$FeO + Fe_2O_3$	6,88	Al	8,13	Al	0,50
MgO	3,49	Fe	5,00	Fe	0,40
CaO	5,08	Ca	3,63	Ca	1,00
Na_2O	3,84	Na	2,83	Na	1,30
K_2O	3,13	K	2,59	K	1,80
TiO_2	1,05	Mg	2,09	Mg	0,30
Total	97,93		98,59		99,90

O = oxigênio
Na = sódio
Mg = magnésio
Al = alumínio
Ti = titânio

Fe = ferro
Si = silício
K = potássio
Ca = cálcio

O papel representado pelo *silício* é considerável, mas é preciso insistir na importância do *oxigênio*: se nos atemos às porcentagens relativas ao peso, a preponderância desse elemento já é nítida, mas se torna ainda mais considerável se se levarem em conta os volumes relativos ocupados pelos diversos constituintes.

Essas diversas considerações nos permitem afirmar que a crosta terrestre tem uma composição silicatada (isto é, é formada essencialmente de silicatos).

Chamamos rocha a todo material constitutivo da crosta terrestre que apresenta os mesmos caracteres de conjunto em extensões significativas. Assim, para toda rocha podemos, tomando em consideração extensões cada vez mais reduzidas, definir sucessivamente: uma jazida, uma pedreira onde a rocha aflora em certo número de pontos, uma amostra recolhida num ponto de afloramento qualquer e uma delgada lâmina destinada ao exame microscópico.

O exame de uma rocha, quer seja rápido, por simples observação visual ou com ajuda de uma lupa, quer seja minucioso, sob a objetiva de um microscópio, permite constatar que essa rocha tem uma constituição heterogênea. Ela é formada por um agregado de grânulos pertencentes a diversas espécies minerais (ou a minerais) diferentes.

Pode-se, pois, considerar que toda rocha apresenta uma homogeneidade

em grande escala, embora seja heterogênea nos pormenores.

A definição de uma rocha tal como a demos não leva em conta as características que ela possa ter. Entre essas propriedades podemos destacar:

A dureza: segundo o enfoque convencional, uma rocha é um seixo, uma pedra, isto é, um corpo duro. Isto é verdade para a maioria das rochas, mas há as que são plásticas e maleáveis como as argilas, e até móveis como a areia seca que "escoa".

A densidade: a densidade média das rochas que constituem a crosta terrestre é igual a 2,7. Essa densidade oscila entre 3,3 para as mais pesadas e 0,43 para alguns petróleos que são, portanto, menos densos que a água. Se a densidade média da Terra é igual a 5,52 isso se deve ao fato de que o centro da Terra é ocupado por um núcleo pesado.

O aspecto físico: os três estados da matéria são encontrados nas rochas. A maioria, evidentemente, está no estado sólido, mas em jazidas petrolíferas, os óleos são líquidos e ali se acham muitas

vezes acompanhados de gases ditos naturais.

O estado de cristalização: entre os constitutivos das rochas (minerais), alguns podem ser perfeitamente cristalizados ou holocristalinos (de *holos,* inteiro) ao passo que outros ficaram no estado vítreo que é o de um vidro de vidraça, por exemplo. Este último caso, pouco freqüente, é também o dos vidros vulcânicos como a obsidiana.

A composição química: esta varia muito, mas na maioria dos casos as rochas são agregados de silicatos.

A natureza nem sempre se acomoda obedientemente às exigências de uma classificação; entretanto, é preciso impor certa ordem em tanta diversidade.

A classificação das rochas é genética, pois se baseia em sua origem presumida.

Distinguimos dois grandes conjuntos de rochas: as rochas de origem externa que se formaram na superfície do globo são chamadas *exógenas;* ao passo que aquelas que, ao inverso, se formaram, pelo menos em parte, no interior

do globo, são chamadas rochas *endógenas*.

As rochas exógenas

As rochas sedimentares são construídas com materiais que foram transportadas e ulteriormente depositados.

A distinção que se estabelece entre as *rochas sedimentares* de um lado, e as *rochas residuais,* de outro, é muito pequena.

A gênese de tais rochas implica a participação de vários processos: fragmentação, alteração e ablação, transporte por diversos agentes (a água, o gelo ou o vento), sedimentação e evolução do depósito em rocha ou *diagênese*.

A fragmentação e alteração se processam sob a ação combinada do clima e dos seres vivos: *alteração química* pelas águas, os ácidos húmicos (provenientes da decomposição da matéria viva vegetal, ou húmus), os sais marinhos corrosivos, etc.; ou *alteração me-*

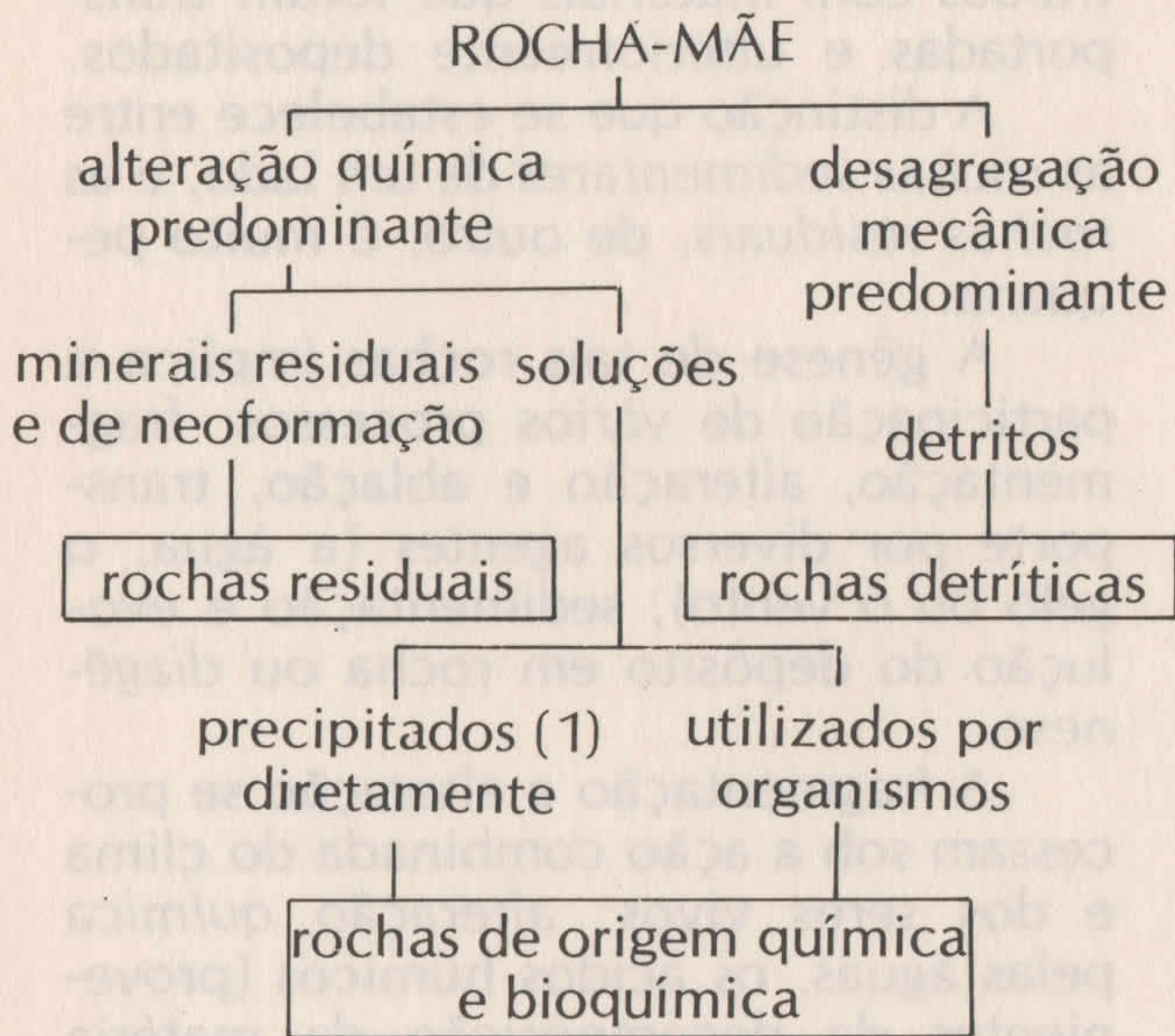
cânica ao sabor das mudanças de temperatura e de umidade da atmosfera, do movimento das ondas, etc.

Quando se dá a alteração por via química de uma rocha-mãe, isolam-se:

— minerais não alteráveis, ditos *minerais residuais*;

ROCHA-MÃE

- alteração química predominante
  - minerais residuais e de neoformação
    - **rochas residuais**
  - soluções
    - precipitados (1) diretamente
      - **rochas de origem química e bioquímica**
    - utilizados por organismos
      - **rochas de origem química e bioquímica**
- desagregação mecânica predominante
  - detritos
    - **rochas detríticas**

---

(1) Precipitação: *fenômeno físico ou químico pelo qual um corpo* sólido *nasce num meio* líquido.

— *soluções* que se afastam rapidamente do lugar de alteração;

— minerais nascidos no curso da alteração, como as argilas, e que são chamados minerais de *neoformação* (de *neo*, novo).

Em contrapartida, quando ocorre a erosão por desagregação mecânica, a rocha-mãe se fragmenta em detritos menores dando origem às *rochas detríticas*.

A sedimentação ou depósito dos sedimentos se faz no meio continental ou marítimo. Advirta-se que os depósitos sedimentares marítimos representam uma massa total muito mais significativa do que a dos depósitos continentais. (Fig. 16)

Entretanto, a história dos sedimentos não se detém aí pois o depósito vai evoluir em rocha: é a *diagênese* no curso da qual diversas manifestações físico-químicas entram em jogo; esse domínio é o da sedimentologia.

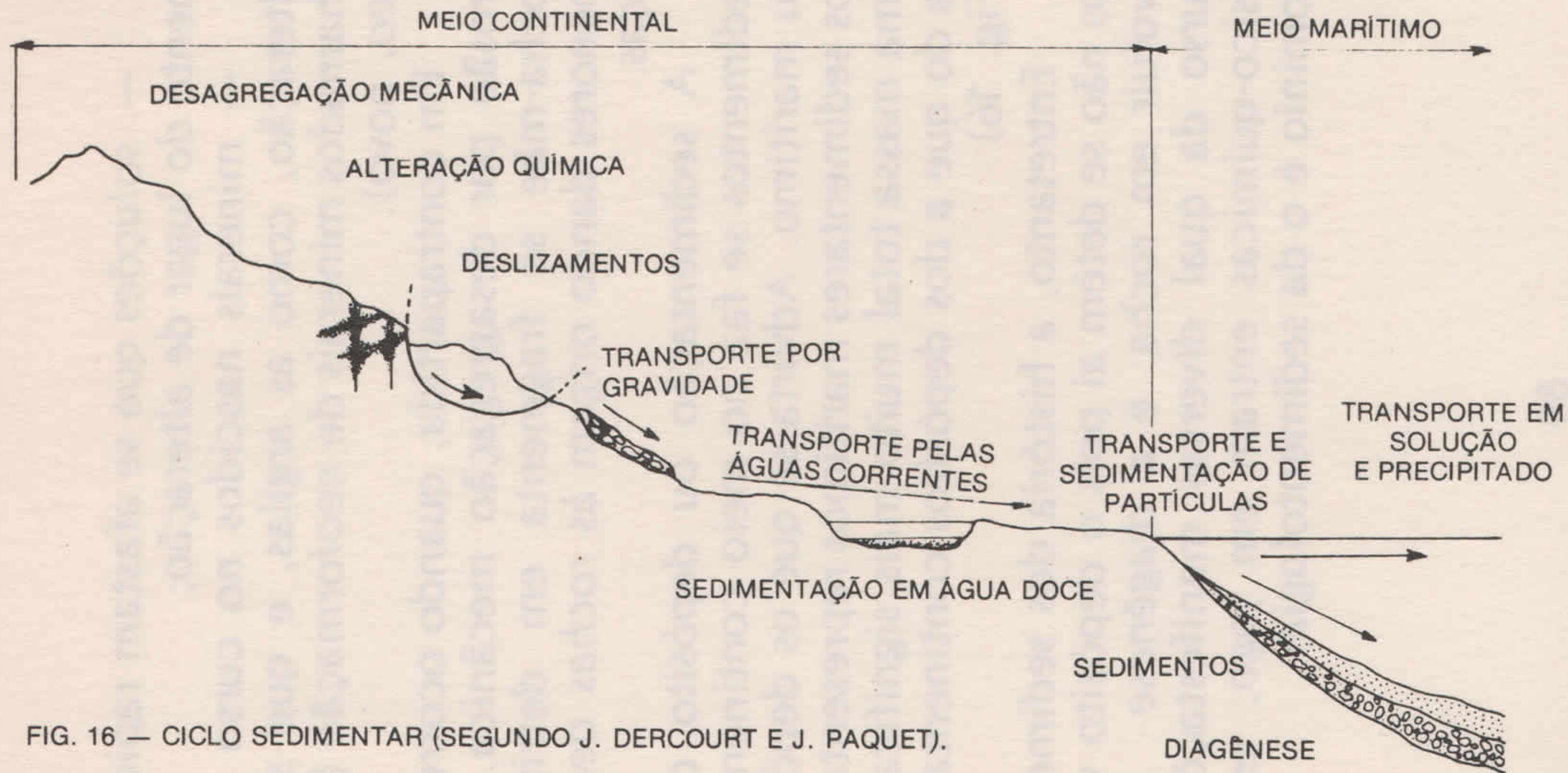



FIG. 16 — CICLO SEDIMENTAR (SEGUNDO J. DERCOURT E J. PAQUET).

As rochas endógenas

Nesse conjunto de rochas de origem interna, distinguiremos *rochas eruptivas* e *rochas metamórficas*.

As rochas eruptivas são oriundas de "magmas" (do grego *magma*, resíduo ou pasta). Estes podem ser considerados como uma mistura fundida, mais ou menos viscosa, de gás, de líquido e de cristais.

Os magmas são suscetíveis de migrar para a superfície.

Quando o magma irrompe à superfície da Terra, dá nascimento às *rochas vulcânicas* ou *efusivas* (basalto, por exemplo). Ao contrário, as outras rochas formadas em profundidade que só aparecem mediante o jogo conjugado das deformações da crosta terrestre e da erosão são as *rochas plutônicas,* cujo tipo mais representativo é o granito.

As rochas eruptivas são também chamadas de *rochas magmáticas* ou *rochas ígneas* (do latim *igneus,* feito de fogo).

As rochas metamórficas

São as que resultam da transformação no local de rochas mais antigas, sob a influência de agentes de origem interna: basicamente a temperatura e a pressão.

São rochas folheadas, característica que lhes vale ainda o nome de *rochas cristalofilianas* (de *cristallo,* cristais e *phyllie,* folha ou folheto).

Estrutura da Terra

Numa primeira abordagem, podemos considerar a Terra como formada de envoltórios concêntricos. Advirta-se desde logo que somente a parte mais superficial de nosso planeta nos é diretamente acessível.

Para fazermos uma idéia correta de sua estrutura, é necessário recorrer aos fenômenos de origem profunda como por exemplo os sismos ou o vulcanismo.

A sismologia nos proporcionará en-

sinamentos relativos ao estado físico, enquanto que o vulcanismo nos permite ter uma idéia da composição química das camadas profundas de nosso globo.

São estes os dois pontos que vamos desenvolver a seguir.

Os sismos

Chama-se *sismo* (ou abalo telúrico, abalo sísmico, ou simplesmente tremor de terra) a uma brutal sacudidela do chão provocada em profundidade por um movimento abrupto de duas zonas profundas. Disso resulta então uma instantânea liberação de energia elástica lentamente acumulada.

O *foco* ou *hipocentro* é o lugar onde se produz o movimento inicial, isto é, onde se libera energia.

Epicentro é chamado o ponto situado na superfície imediatamente abaixo do foco. (Fig. 17)

O efeito de um sismo é duplo: por um lado, vibrações atingem a superfície e deslocam os constitutivos da crosta

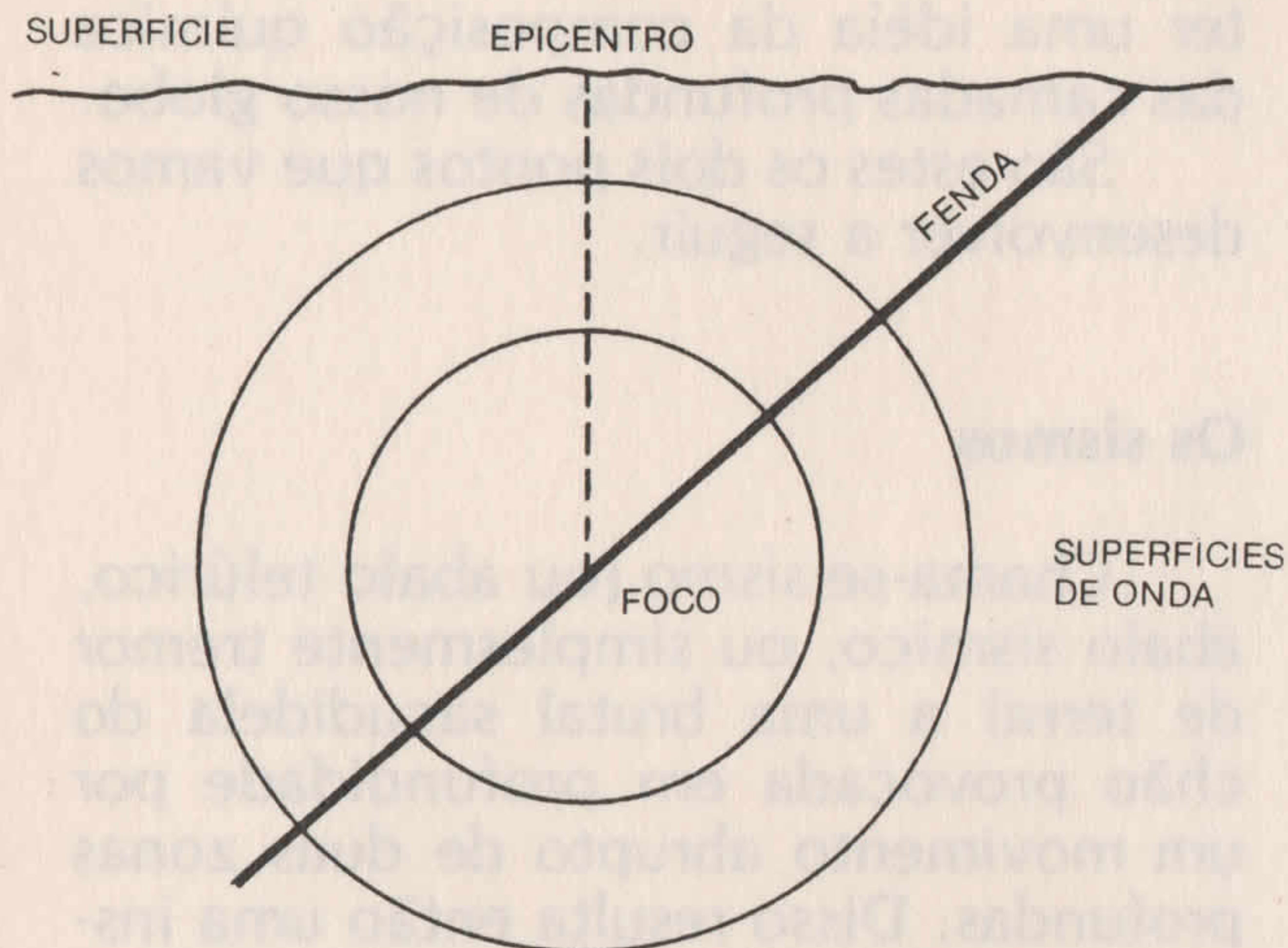



FIG. 17 — RELAÇÃO ENTRE O FOCO E O EPICENTRO.

terrestre, o que provoca modificações topográficas acompanhadas de destruições; por outro lado, vibrações se propagam às camadas próximas no interior do globo, alcançando sua superfície às vezes muito longe do epicentro depois de ter sofrido reflexos e refrações...

Portanto as ondas recolhidas são modeladas pelos diferentes envoltórios

da Terra. A análise dos registros permite desvendar a geometria e a composição das camadas atravessadas.

As vibrações produzidas no foco se propagam através da Terra.

Cada partícula mineral se desloca muito pouco; ela oscila em torno de sua posição de equilíbrio. O movimento e a energia associada, em contrapartida, se transmitem muito rapidamente de uma partícula a outra nas longas distâncias. As vibrações são tão rápidas que não são associadas senão a um intercâmbio muito ligeiro de calor; elas atravessam a Terra com uma velocidade que podemos determinar.

Assim, pouco tempo depois do começo de um sismo, nota-se em volta do foco uma superfície chamada *frente de ondas* que separa as partículas que já entraram em vibração das ainda não atingidas. As ondas sísmicas provocam deformações elásticas que se propagam a velocidades diferentes:

— As ondas longitudinais ou de compressão (ondas P), onde cada partícula se desloca.

— As ondas transversais ou de cisalhamento (ondas S), onde cada partícula se desloca num plano, transmitindo esse mesmo movimento às suas vizinhas.

Na parte superficial do globo, as ondas progridem de maneira complexa. De fato, podemos reconhecer ali, além

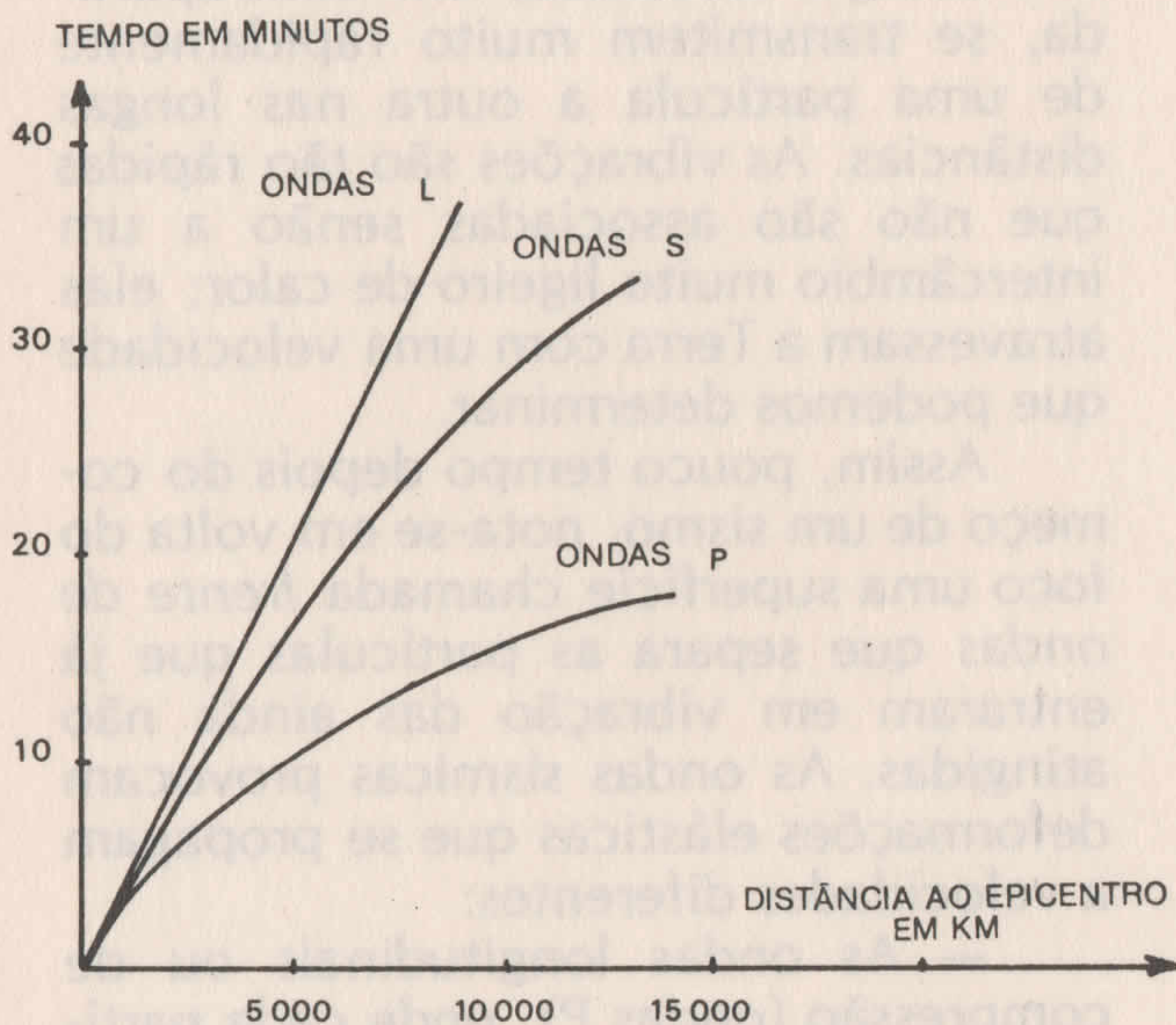



FIG. 18 — DIAGRAMA DA VELOCIDADE DAS ONDAS SÍSMICAS.

A Terra vista do espaço.

das ondas P e S, outras onde a partícula é afetada por um movimento circular em torno de seu ponto de equilíbrio e finalmente outras animadas de um movimento de torsão.

Estes dois últimos tipos são as ondas L.

As ondas P e S têm velocidades que aumentam com as distâncias percorridas. (Fig. 18) Como a velocidade de propagação é função da densidade do meio atravessado, deduz-se que as ondas que atravessam as camadas profundas do globo circulam em meios diferentes dos da superfície.

As ondas L têm velocidade constantes; em conseqüência, o meio percorrido não muda de propriedades com o distanciamento do foco.

Dos fatos precedentes, deduz-se, em largos traços, a constituição do globo terrestre.

Como um mesmo meio não pode veicular ondas de um mesmo tipo (P ou S) com velocidades diferentes, isto implica que, quando duas ondas de compressão, por exemplo, são recebidas

numa estação, elas são propagadas em dois meios diferentes.

Observações de registros de sismos (ou sismogramas)

As ondas L estão ausentes nos registros de sismos com focos profundos, cujo meio suscetível de transmiti-las não existe senão na superfície. Essa película, presente em toda a superfície do globo, é constituída de sedimentos não consolidados ou de rochas sedimentares.

Se, para um determinado sismo, consideramos os sismogramas obtidos nas diferentes estações cada vez mais distantes do epicentro, verificamos que (Fig. 19):

— de 800 a 11.500 quilômetros, as ondas P são progressivamente amortecidas;

— de 11.500 a 14.000 quilômetros, as estações não recebem nenhuma onda direta: é *uma zona de sombra*.

A presença dessa zona de sombra

implica a existência no globo de uma superfície de descontinuidade separando um meio exterior no qual as ondas se deslocam a grande velocidade, de um meio interior onde sua velocidade é mais reduzida.

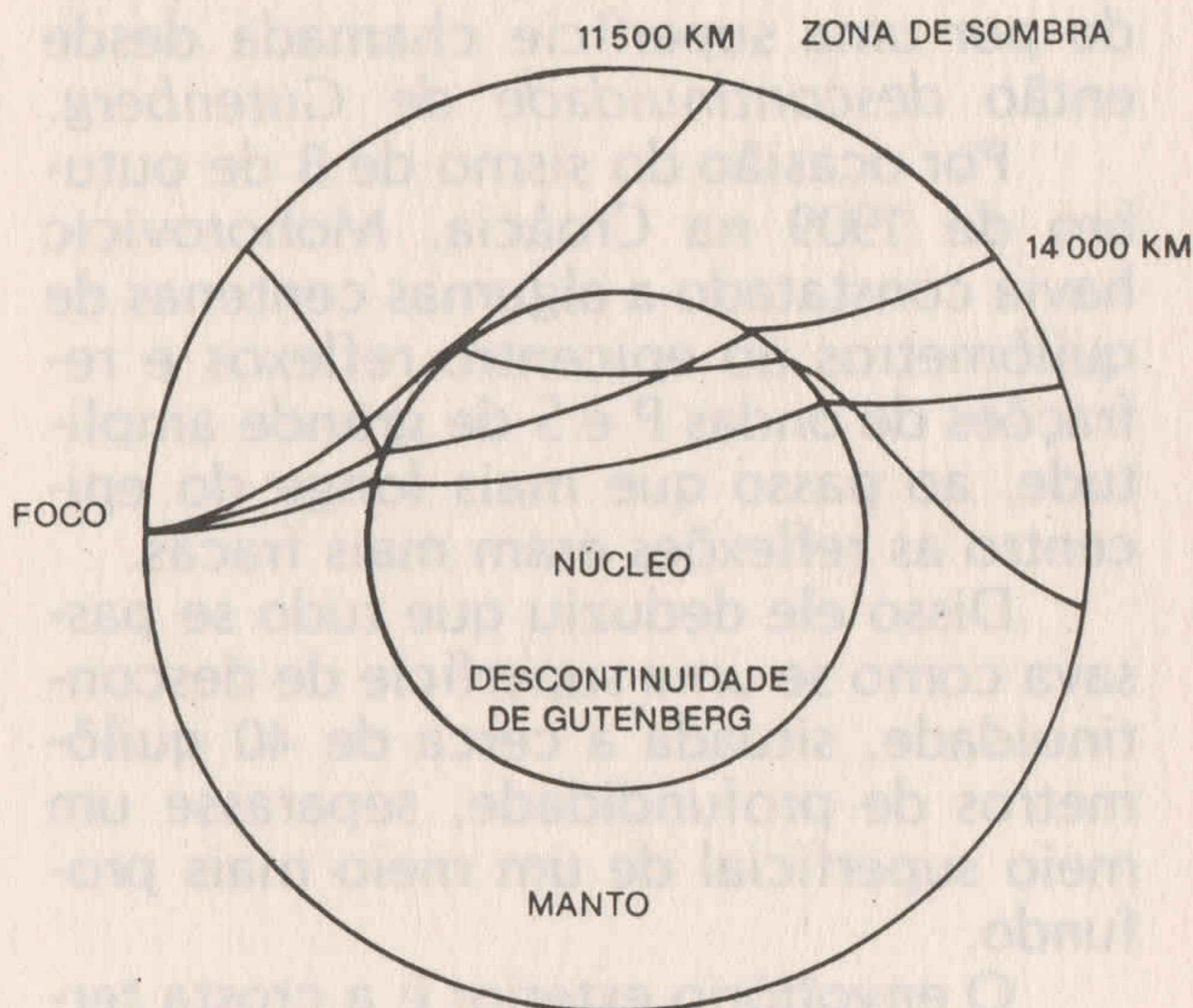



FIG. 19 — NÚCLEO POSTO EM EVIDÊNCIA.

Gutenberg (1950) mostrou que tudo se passava como se uma superfície de descontinuidade situada a 2.900 quilômetros de profundidade encerrasse uma matéria de forte densidade (ondas de pouca velocidade) e a separasse de um meio de densidade mais fraca (ondas de velocidade elevada).

Assim, distinguimos um núcleo central de um manto periférico separado por uma superfície chamada desde então *descontinuidade de Gutenberg.*

Por ocasião do sismo de 8 de outubro de 1909 na Croácia, Mohorovicic havia constatado a algumas centenas de quilômetros do epicentro reflexos e refrações de ondas P e S de grande amplitude, ao passo que mais longe do epicentro as reflexões eram mais fracas.

Disso ele deduziu que tudo se passava como se uma superfície de descontinuidade, situada a cerca de 40 quilômetros de profundidade, separasse um meio superficial de um meio mais profundo.

O envoltório exterior é a crosta terrestre, separada do manto pela *descon-*

tinuidade de Mohorovicic ou *Moho*.

A sismologia é uma das técnicas que proporcionam maior número de dados sobre a estrutura interna do globo. Demonstra ela que a Terra é constituída por camadas concêntricas sucessivas, as quais possuem qualidades elásticas diferentes e são separadas umas das outras por descontinuidades. Permite determinar a profundidade e a espessura desssas diferentes camadas. Evidencia também que todas essas camadas são constituídas por meios rígidos e não por meios líquidos, como durante muito tempo se pensou.

Efetivamente, trabalhos recentes demonstraram existir uma heterogeneidade no manto. (Fig. 20).

Existe no manto, regularmente repartida sobre o conjunto do globo, uma zona onde as ondas têm velocidades de propagação fracas. É uma zona que surge abruptamente entre 80 e 100 quilômetros de profundidade e que se estende em espessura por cerca de 100 quilômetros: é a *astenosfera*. O termo foi criado por J. Barrel em 1914. Designa

essa região particularmente fundida mas para a qual em média a taxa de fusão não excede de 4%.

Em resumo, distinguimos (Fig. 21):

— o manto superior que, com a crosta, constitui a *litosfera;*

— uma zona de transição percorrida a baixa velocidade: a *astenosfera;*

— o manto profundo;

— o núcleo;

— o caroço (ou núcleo profundo).

A tectônica global e a deriva dos continentes

A história da Terra está inscrita nos depósitos sedimentares superpostos em camadas sucessivas.

O estudo dessas camadas ou estratos é a *estratigrafia.* Nas bacias sedimentares, as camadas se depositam horizontalmente e permanecem mais ou menos nessa posição. Nas regiões montanhosas, ao contrário, as deformações são evidentes.

A *tectônica* (do grego *tektonikos,*

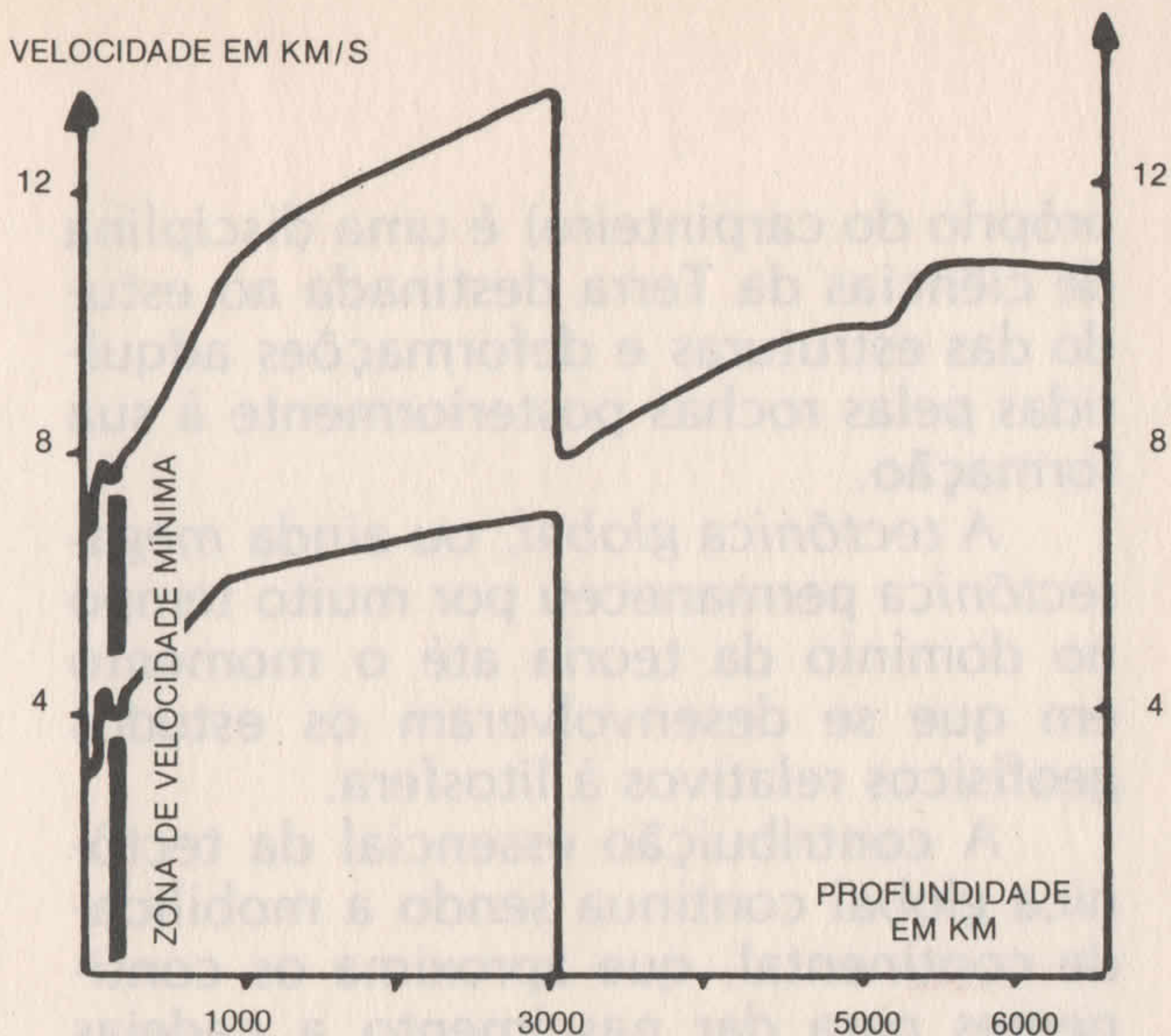



FIG. 20 — DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.

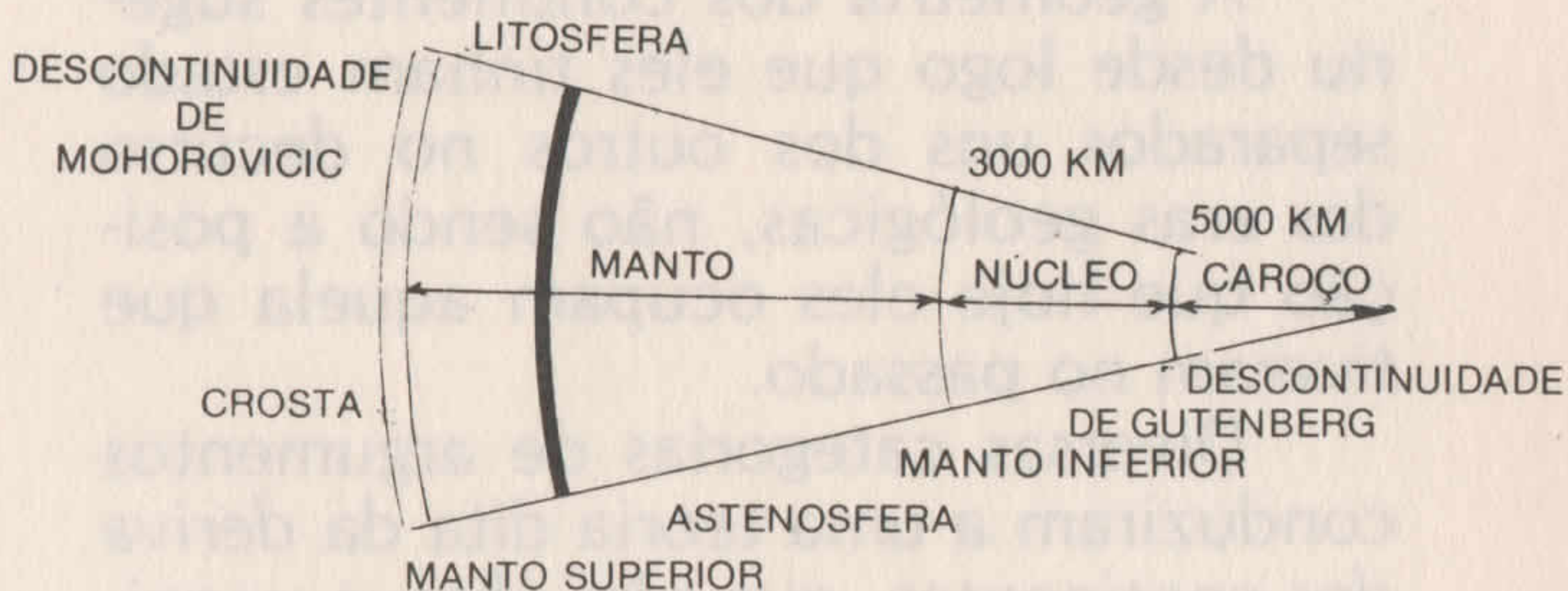



FIG. 21 — ESTRUTURA INTERNA DA TERRA
(PARA MAIOR CLAREZA, A ESCALA DAS ESPESSURAS NÃO FOI OBSERVADA).

próprio do carpinteiro) é uma disciplina de ciências da Terra destinada ao estudo das estruturas e deformações adquiridas pelas rochas posteriormente à sua formação.

A *tectônica global,* ou ainda *megatectônica* permaneceu por muito tempo no domínio da teoria até o momento em que se desenvolveram os estudos geofísicos relativos à litosfera.

A contribuição essencial da tectônica global continua sendo a mobilidade continental, que aproxima os continentes para dar nascimento a cadeias de montanhas, ou que os afasta para gerar os oceanos.

A geometria dos continentes sugeriu desde logo que eles tinham estado separados uns dos outros no decurso das eras geológicas, não sendo a posição que hoje eles ocupam aquela que tiveram no passado.

Diversas categorias de argumentos conduziram a uma teoria dita da *deriva dos continentes,* que não obteve unanimidade pois faltava um motor a esse mecanismo.

Dados físicos essencialmente relacionados com o magnetismo das rochas obrigaram os geofísicos a tomar essa teoria em consideração, mas o estudo morfoestrutural dos oceanos é que seria o motor dessa fecunda teoria.

As costas da Europa e do Atlântico, por um lado, e da América do Norte e do Sul, por outro, parecem encaixar-se facilmente. Entretanto, a imbricação deixa dois importantes vazios que desaparecem quando unimos, não mais as costas como o fazia o meteorologista alemão Wegener, mas sim os taludes continentais, como se fez mais tarde.

Geomorfologia submarina (Fig. 22)

Quando partimos da praia e nos dirigimos para alto-mar, encontramos de início uma plataforma imersa, chamada *plataforma continental,* descendo em rampa bastante suave até uma profundidade de 130 a 150 metros. O talude continental que lhe dá seguimento mostra um declive mais acentuado de

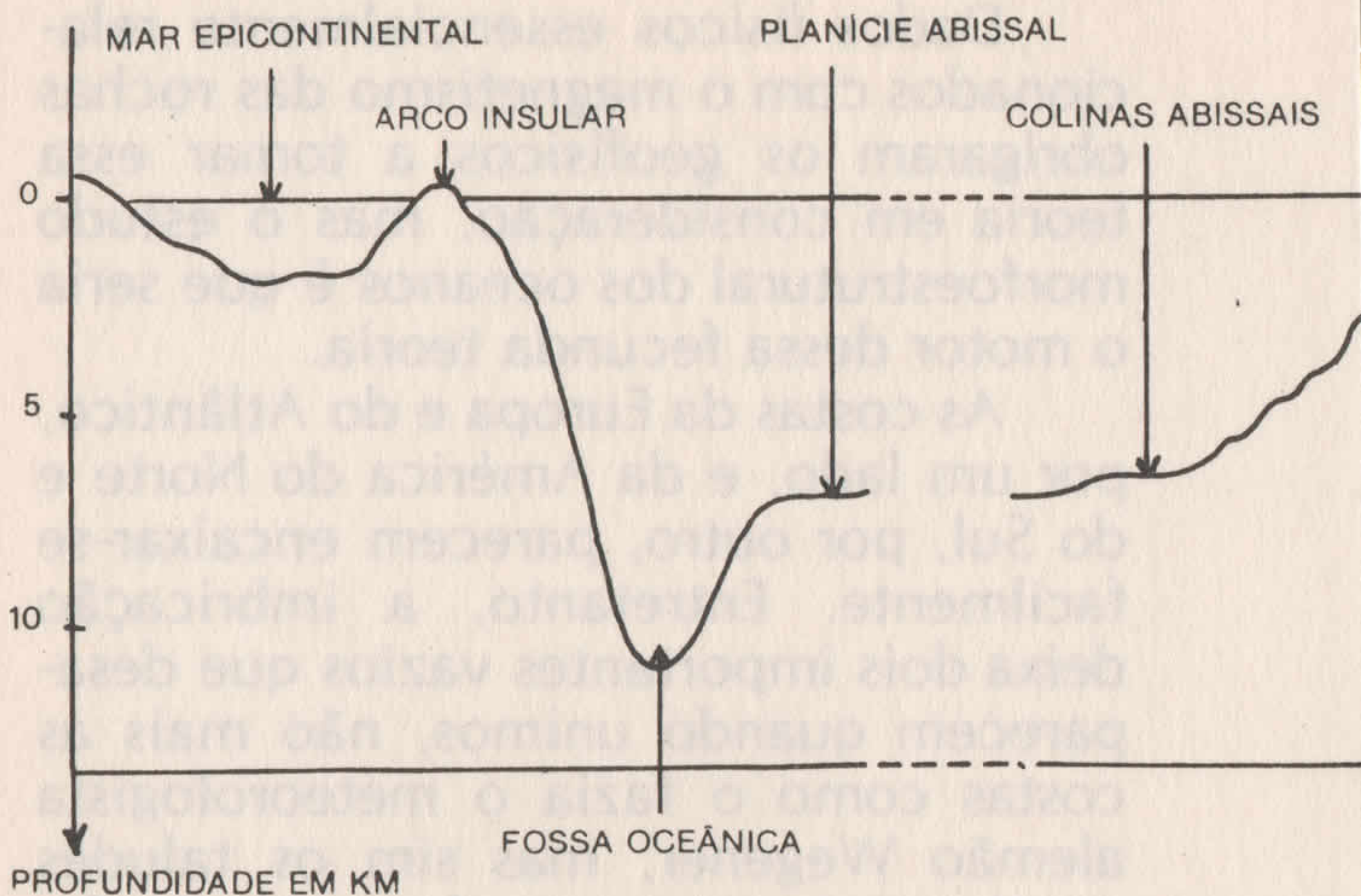
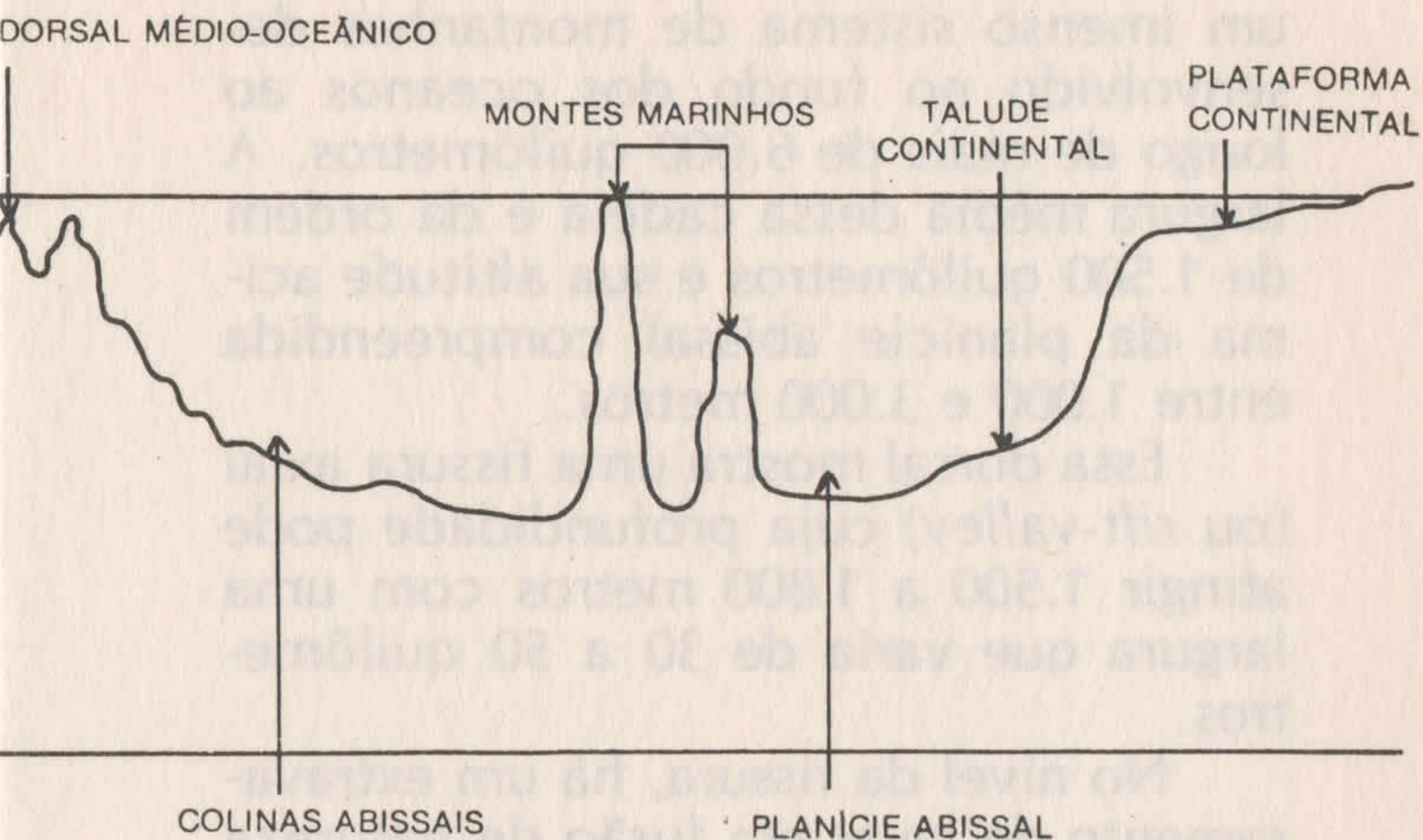



FIG. 22 — PERFIL DO FUNDO DO MAR

3° a 6° em média, mas podendo chegar até a 45°; desce até mais ou menos 3.000 metros.

O talude continental é muitas vezes entalhado por *canyons* submarinos cujas paredes laterais têm uma inclinação muito pronunciada. O conjunto da plataforma e do talude constitui o *pré-continente*.

A maior parte das bacias oceânicas

é ocupada pela planície abissal cuja profundidade se escalona entre 3.000 e 6.000 metros, mas ao longo de distâncias tão grandes que a inclinação média é sempre muito fraca. A monotonia dessa planície abissal é cortada pelas dorsais oceânicas e pelas grandes fossas, como a fossa das Marianas, por exemplo.

As dorsais oceânicas constituem

um imenso sistema de montanhas desenvolvido no fundo dos oceanos ao longo de mais de 6.000 quilômetros. A largura média dessa cadeia é da ordem de 1.500 quilômetros e sua altitude acima da planície abissal compreendida entre 1.000 e 3.000 metros.

Essa dorsal mostra uma fissura axial (ou *rift-valley*) cuja profundidade pode atingir 1.500 a 1.800 metros com uma largura que varia de 30 a 50 quilômetros.

No nível da fissura, há um extravasamento de lavas em fusão de natureza basáltica, proveniente do manto terrestre. Essa expansão de um lado e de outro do *rift*, ou *expansão dos fundos oceânicos*, explica que a idade das rochas e da crosta oceânica cresça à medida que nos afastamos dessa fossa e explica igualmente a deriva dos continentes.

A expansão dos fundos oceânicos ao nível das dorsais (zonas de acreção) que determina um aumento da superfície do globo é compensada pela reabsorção da litosfera ao nível dos arcos

insulares ou dos bordos continentais de tipo pacífico (zonas de consumo ditas de *subdução*).

Teoria das placas

Vimos que a litosfera constitui a parte superior do conjunto crosta-manto. A litosfera está em estado sólido, enquanto que a astenosfera, que representa a parte profunda do manto supe rior, se apresenta viscosa.

A litosfera assim definida é dividida em certo número de "placas" que se distanciam umas das outras ao nível das fissuras axiais onde se forma a crosta oceânica basáltica.

Mecanismos compensadores que se acham no nível das zonas ditas de Benioff (ou de subdução) absorvem a crosta assim criada.

Essas zonas de subdução se localizam:

— ao nível das fossas oceânicas e dos arcos insulares associados. Lá, de fato, a crosta oceânica formada se reab-

sorve e mergulha no manto;

— ao nível do limite pacífico do continente americano onde se ergue importante cordilheira (Montanhas Rochosas, Cordilheiras dos Andes). (Fig. 23).

O mapa mundial da distribuição dos sismos (Figs. 24 e 25) traduz claramente os setores onde se cria e onde se reabsorve a crosta; comportando-se a capa terrestre como um sólido viscoso no qual o reerguimento da crosta oceânica, ao nível das dorsais, e a reabsorção, ao nível das zonas de subdução, descontínuas no tempo, produzem sismos.

O basalto e a gênese basáltica

Vimos que o basalto forma o piso dos oceanos, isto é, a crosta oceânica. Os basaltos são rochas de extravasamento que provêm da cristalização de uma mistura de silicatos fundidos ou magma. Esses basaltos são emitidos ou por centros pontuais, ou por profundas

EURÁSIA

ÁFRICA

ÍNDIA

ANTÁRTICA

PACÍFICO

AMÉRICA

CARAÍBAS

NAZCA

ÁFRICA

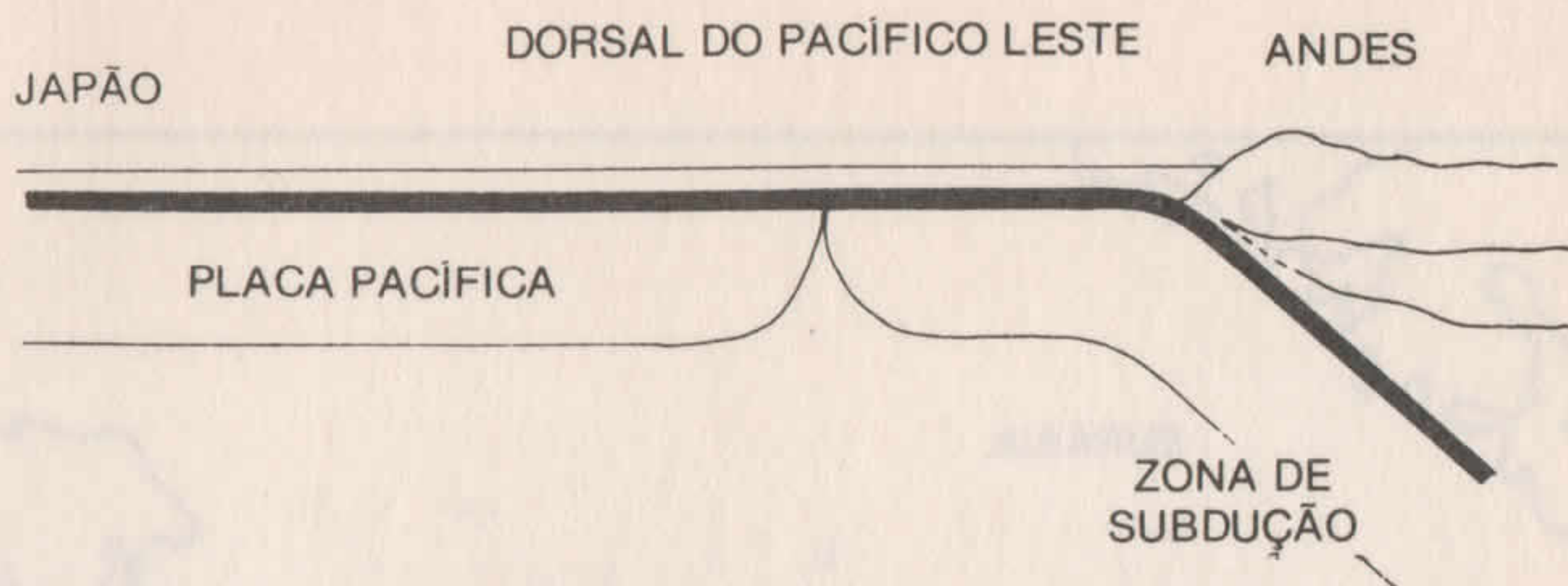
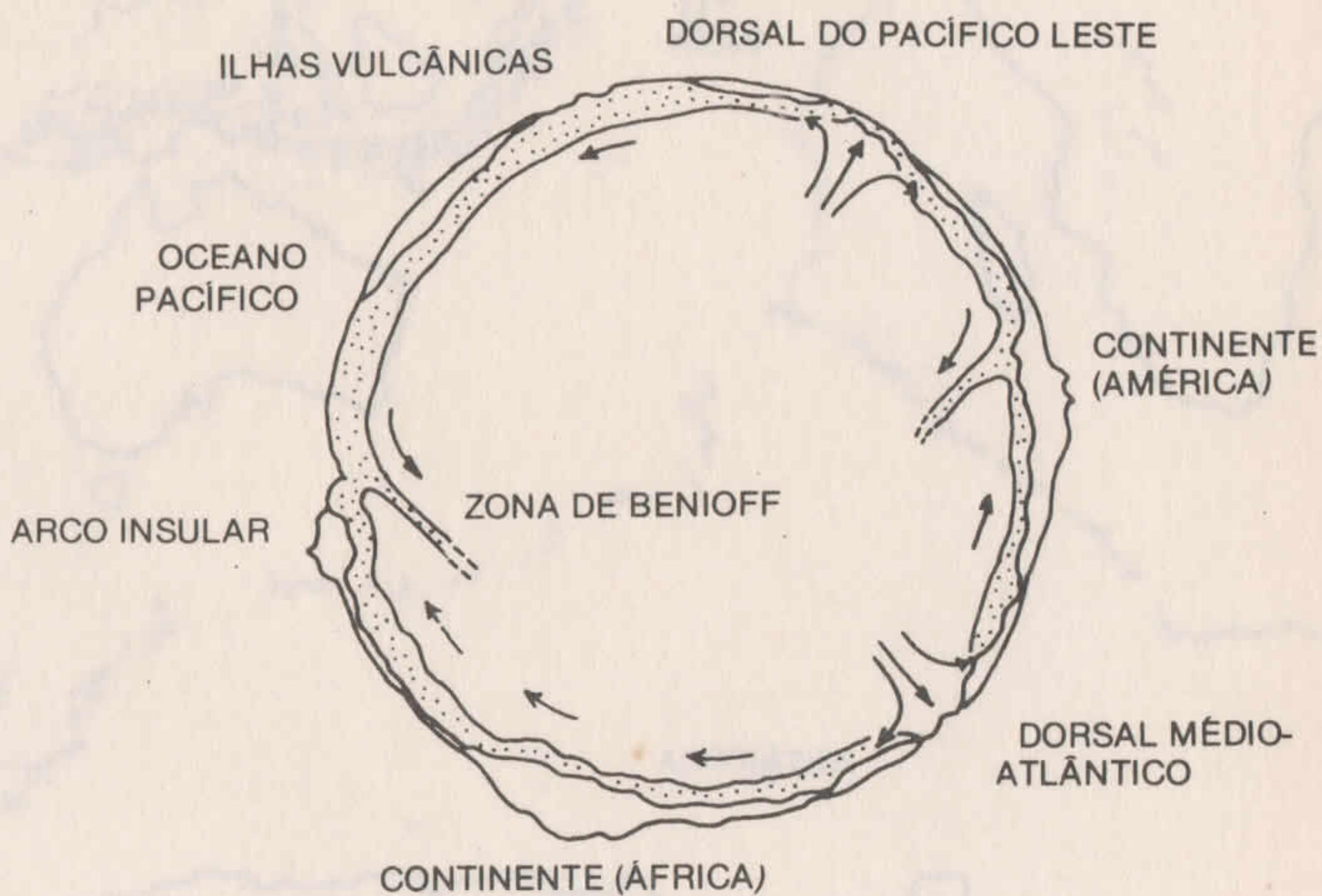
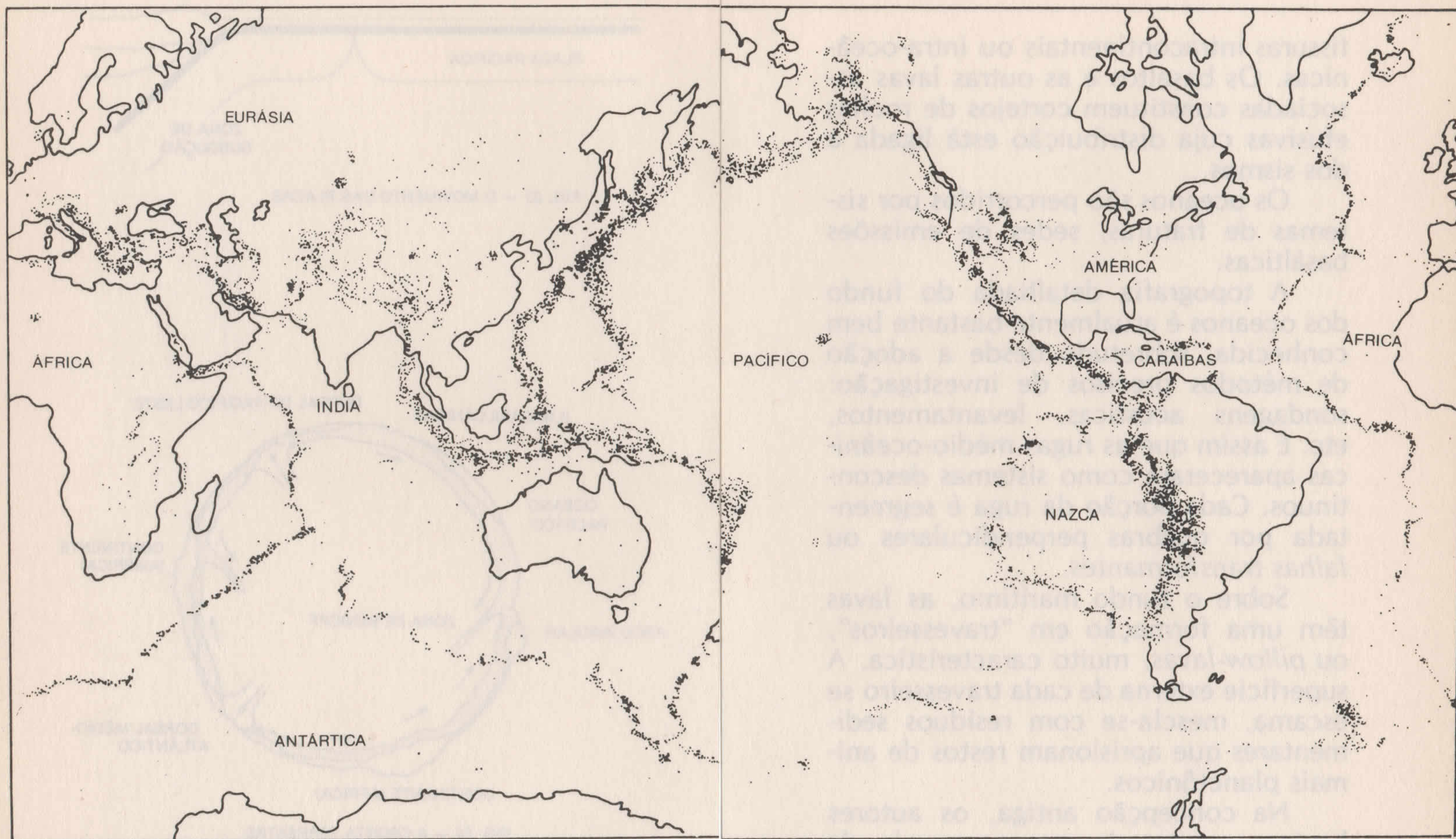



FIG. 25 — AS PLACAS DO GLOBO TERRESTRE E A REPARTIÇÃO DOS EPICENTROS DOS SISMOS MAIS FREQUENTES.

fissuras intracontinentais ou intra-oceânicas. Os basaltos e as outras lavas associadas constituem cortejos de rochas efusivas cuja distribuição está ligada à dos sismos...

Os oceanos são percorridos por sistemas de fraturas, sedes de emissões basálticas.

A topografia detalhada do fundo dos oceanos é atualmente bastante bem conhecida, sobretudo desde a adoção de métodos precisos de investigação: sondagens acústicas, levantamentos, etc. É assim que as rugas médio-oceânicas apareceram como sistemas descontínuos. Cada porção da ruga é segmentada por quebras perpendiculares ou *falhas transformantes.*

Sobre o fundo marítimo, as lavas têm uma formação em "travesseiros", ou *pillow-lavas,* muito característica. A superfície externa de cada travesseiro se escama, mescla-se com resíduos sedimentares que aprisionam restos de animais planctônicos.

Na concepção antiga, os autores haviam constatado que na escala da

Uma parte importante da "face oculta" da Lua, fotografada pelos astronautas da Apolo VIII.

Terra existiam basaltos idênticos no tempo e no espaço. Dessas considerações nasceu a hipótese de uma camada profunda, única, de composição basáltica, de onde provinha o basalto. Essa camada, que formava o manto terrestre tinha recebido o nome de "sima" pois seus elementos mais abundantes são o silício e o magnésio. Para esses autores antigos, o "sima" era uma camada em estado permanente de fusão.

Sabemos, graças à sismologia, que essas considerações são falsas. De fato, constatamos que o manto terrestre é sólido, somente existe uma zona onde as ondas têm velocidades e intensidades diminuídas. Essa zona, chamada astenosfera, é parcialmente fundida; de fato, existe um líquido intersticial. O basalto se forma, portanto, no limite do manto superior e do manto inferior.

O basalto não tem origem senão localmente em lugares chamados *hot-spots,* ou "pontos quentes" e que se encontram nos limites das placas. A astenosfera, que surge entre 80 e 100 quilômetros de profundidade, sobe até

50 quilômetros ao nível dos *hot-spots*.

Estes se localizam quer nos limites divergentes: 95% do vulcanismo terrestre; quer nas zonas de convergência, ao nível dos planos de Benioff; quer nos limites das falhas transformantes. Existe uma quarta localização que fica na origem do vulcanismo intraplacas:

— no interior de uma placa oceânica: é o caso do Havaí;

— no interior de placas continentais: trata-se por exemplo do vulcanismo de Auvergne ou da grande fissura axial africana.

A atmosfera terrestre

A palavra atmosfera designa os envoltórios de natureza gasosa que circundam a Terra. Outros objetos celestes têm igualmente uma atmosfera. A atmosfera é um fluido no interior do qual se podem notar movimentos.

O conjunto constituído pela Terra e sua atmosfera tem um comportamento complexo.

Existem fontes quentes e fontes frias entre as quais a temperatura varia de maneira quase contínua.

Pode-se admitir que uma fonte quente única se situa entre os trópicos e que cada região polar constitui uma fonte fria.

Os movimentos da atmosfera asseguram as permutas térmicas entre essas zonas. Eles obtêm assim um certo equilíbrio ao limitar os desvios de temperatura entre as regiões submetidas ou não à insolação segundo as estações, o dia, a noite...

A atmosfera terrestre, indispensável por si mesma à biosfera, provavelmente o é também por seu papel regulador.

Altura limite da atmosfera

A massa da atmosfera é avaliada em 5 x 10^{18} quilos, ou seja, cerca de um milionésimo da massa da Terra. Pode-se afirmar que, em média, a metade da massa da atmosfera se acha abaixo

de 5.500 metros e 99% abaixo de 30.000 metros.

Se, ao nível do solo, a pressão atmosférica é de 1.013 milibares (mb), as medidas efetuadas a grande altitude, por meios modernos, mostram que ela não é senão da ordem de 0,8mb a 50 km; 0,0003mb a 100km e 2 x 10^{-7} mb a 300km.

Atualmente supõe-se que a altura limite da atmosfera se situaria numa zona de transição bastante espessa compreendida entre 500 e 1.000 quilômetros.

É preciso, porém, ter em mente que 90% da massa atmosférica constituem um invólucro de 16 quilômetros de espessura, bastante delgado em confronto com os 6.378 quilômetros do raio terrestre.

Composição da atmosfera

O ar atmosférico é uma mistura de gases contendo partículas líquidas e sólidas em suspensão.

Os gases, cujas proporções perma-

Composição	Porcentagem
azoto (N_2)	78,09
oxigênio (O_2)	20,95
argônio (Ar)	0,93
gás carbônico (CO_2)	0,03
neon (Ne)	$1,80 \times 10^{-3}$
hélio (He)	$5,24 \times 10^{-4}$
criptônio (Kr)	$1,00 \times 10^{-4}$
hidrogênio (H_2)	$5,00 \times 10^{-5}$
xenônio (Xe)	$8,00 \times 10^{-6}$
ozônio (O_3)	$1,00 \times 10^{-6}$
radônio (Rn)	$6,00 \times 10^{-18}$

necem sensivelmente constantes, formam o que chamamos de ar seco. Para as necessidades da meteorologia, sua composição foi fixada internacionalmente.

Entre os gases que existem em proporção variável na atmosfera, pode-se citar, além do gás carbônico, o ozônio e o radônio; o vapor de água e os óxidos de azoto que são muito instáveis.

Estrutura da atmosfera (Fig. 26)

As numerosas medições efetuadas

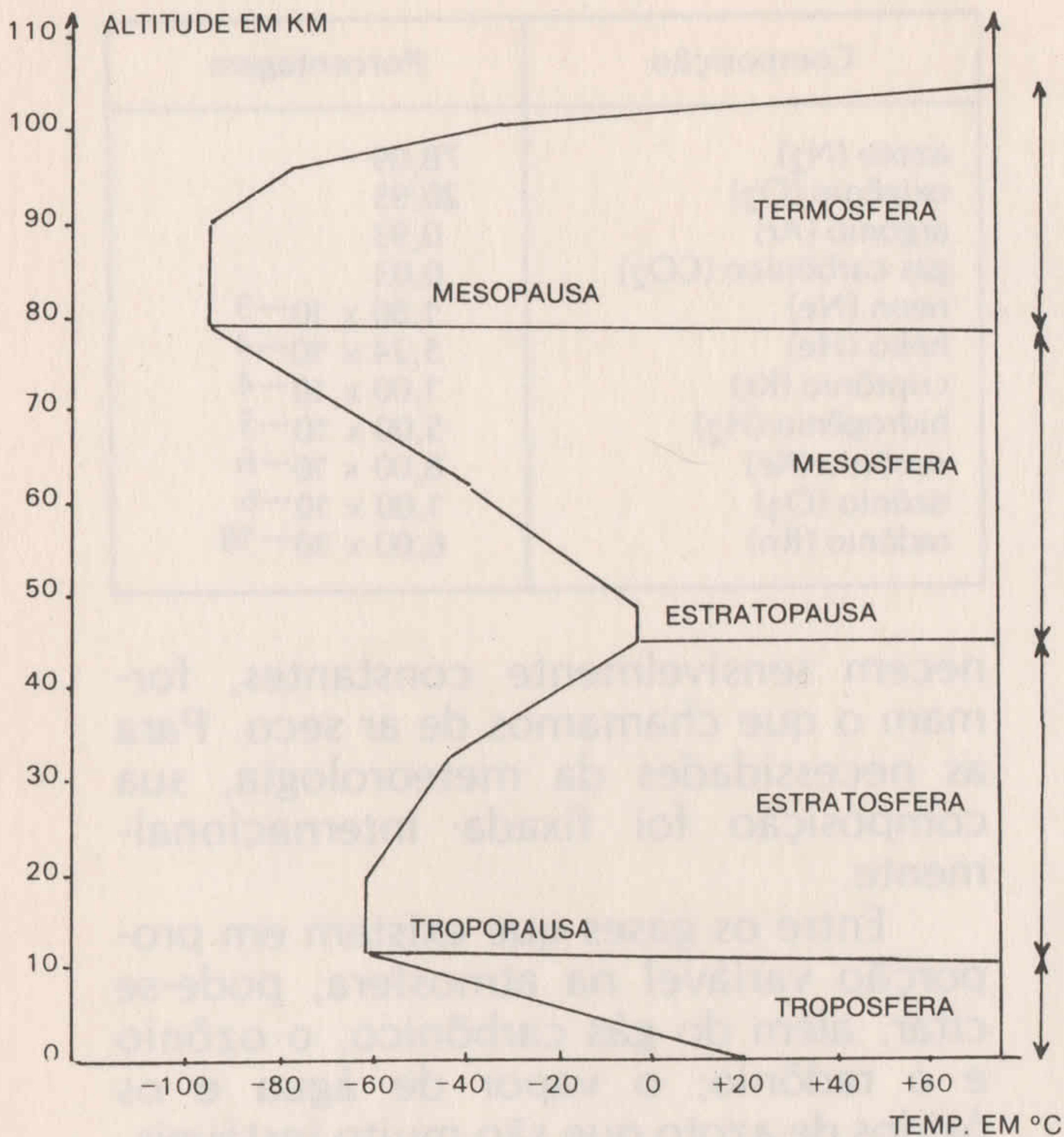



FIG. 26 — ESTRUTURA DA ATMOSFERA TERRESTRE.

permitem fazer uma idéia da repartição das temperaturas segundo a altitude.

Depois de inúmeras polêmicas, uma nomenclatura foi admitida em escala internacional (Helsinki 1960).

Na atmosfera, distinguem-se diversas zonas: a mais baixa é a *troposfera,* onde a temperatura decresce até um nível chamado *tropopausa*. A partir da tropopausa, ela cessa de diminuir, ou melhor, diminui mais fracamente.

Podemos considerar que os fenômenos meteorológicos praticamente são todos observados nessa região que se estende até nove quilômetros nos polos, e uma dezena de quilômetros sob os trópicos.

Mais além, alteia-se a *estratosfera*, zona onde a temperatura, inicialmente pouco variável até cerca de 25 a 30 quilômetros, aumenta até a altura dos 50 quilômetros (*estratopausa*), devido à absorção da irradiação solar pelo ozônio.

A *mesosfera* se estende até o mínimo de temperatura situado a cerca de 80 quilômetros e correspondendo à *mesopausa*.

Mais acima, na *termosfera,* a tem-

peratura aumenta constantemente para atingir perto de 1.000°C a 200 quilômetros.

A fonte primordial da energia recebida pela superfície do globo e pela atmosfera é a irradiação solar.

Essa energia, por seu turno, é parcialmente refletida pela superfície terrestre, os oceanos e a atmosfera, ou absorvida por esses diferentes meios; ao passo que outra parte mantém o movimento incessante das massas de ar e das correntes marinhas. Mais acuradamente: esse movimento é a conseqüência da repartição desigual, em latitude, da energia recebida. Existe, pois, um transporte de calor das regiões tropicais para as regiões polares.

Demonstra-se que esse transporte de calor é assegurado em 90% pelas correntes marítimas e atmosféricas.

A lei da gravitação universal (Fig. 27) nos diz que a gravidade na superfície de um astro varia com o seu raio, e sua densidade média. Se esse astro for pequeno demais, uma atmosfera gasosa terá tendência a difundir-se no espaço e

B

d F

$$\vec{F} = k \frac{m_A \, m_B}{d^2}$$

A F

1 F VALOR ABSOLUTO DA FORÇA EXERCIDA POR UM CORPO SOBRE OUTRO
k CONSTANTE DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL
m_A MASSA DO CORPO A
MASSA DO CORPO B
d DISTÂNCIA DOS CORPOS A E B

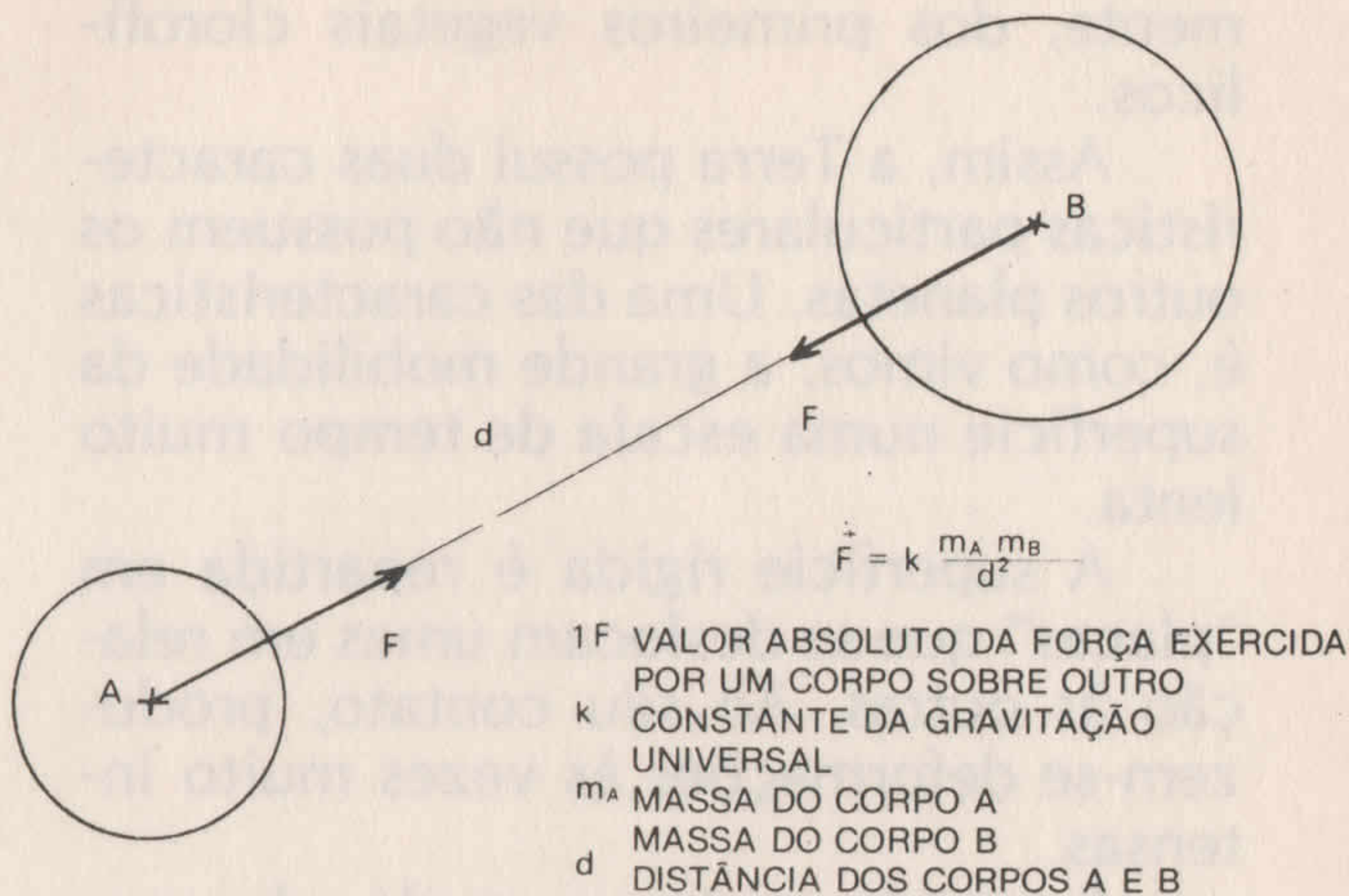



FIG. 27 — A LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL.

desaparecer. Só os planetas bastante maciços podem, ao que parece, conservar uma atmosfera e isso tanto mais facilmente por serem menos quentes. A atmosfera da Terra não é uma atmosfera primitiva, resultando, isto sim, de uma diminuição em gás do primeiro envoltório magmático.

Essa atmosfera assim formada modificou-se a seguir com o aparecimento dos primeiros seres vivos e, especial-

mente, dos primeiros vegetais clorofílicos.

Assim, a Terra possui duas características particulares que não possuem os outros planetas. Uma das características é, como vimos, a grande mobilidade da superfície numa escala de tempo muito lenta.

A superfície rígida é repartida em "placas" que se deslocam umas em relação às outras. Ao seu contato, produzem-se deformações às vezes muito intensas.

Em toda parte se pode observar uma alternância da erosão e da sedimentação dos materiais assim formados. Disso resulta uma renovação permanente da superfície.

A outra particularidade é, está claro, a existência da vida.

Geomagnetismo e magnetosfera

O *geomagnetismo* ou magnetismo terrestre surgiu com o aparecimento da bússola, que revela em toda parte no

globo a existência de um campo magnético natural.

Esse campo magnético parece provir dos movimentos da matéria fundida essencialmente metálica do núcleo e do caroço, cujo raio é igual à metade do raio terrestre.

Em todo ponto da Terra existe um campo magnético definido por sua intensidade e sua direção. (Fig. 28)

O campo magnético num ponto e num instante dados é um vetor F definido em relação aos eixos geográficos.

Ox é dirigido para o norte geográfico definido segundo o eixo de rotação da Terra. Oy é dirigido para o leste geográfico e Oz é a vertical do lugar.

O plano vertical contendo F é o meridiano magnético do lugar, sendo OH o seu traçado sobre o plano horizontal; a orientação desse plano é definida pelo ângulo D ou *declinação magnética* e pelo ângulo I ou *inclinação magnética* que é o ângulo de F com o plano horizontal.

Num momento dado, as circunstâncias do magnetismo não são as mes-

NORTE GEOGRÁFICO
MERIDIANO MAGNÉTICO
X
H
xD
O
I
Y
LESTE
F
CAMPO MAGNÉTICO TOTAL
Z
D = DECLINAÇÃO
I = INCLINAÇÃO
VERTICAL DO LUGAR

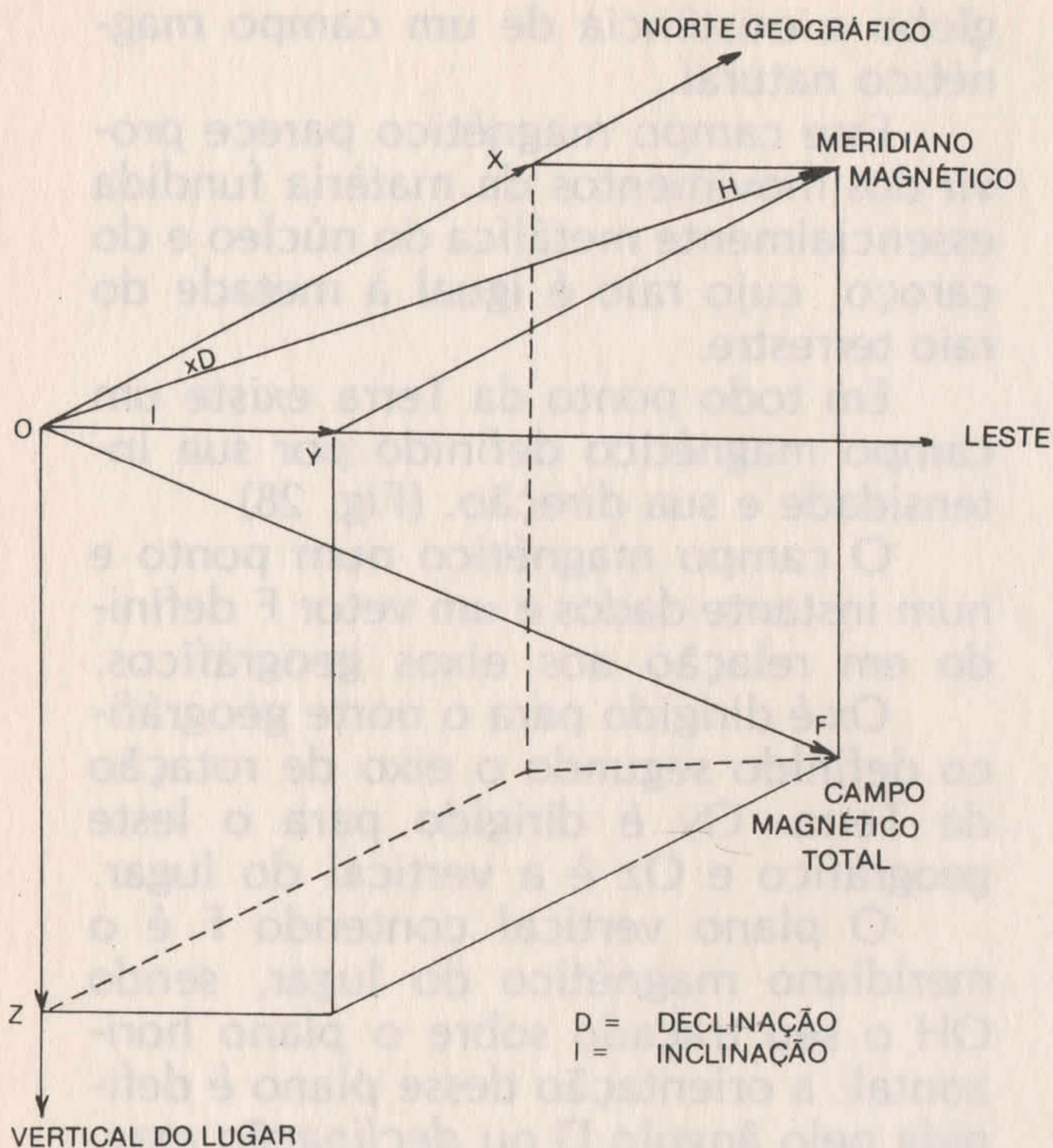



FIG. 28 — O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.

mas de um ponto a outro do globo. As estações que têm a mesma declinação D são ligadas entre si por linhas ditas

isógonas, enquanto que as que têm a mesma inclinação I são ligadas entre si por *isóclinas*.

As isóclinas constituem um sistema de paralelas mais ou menos deformadas. A isóclina O (inclinação nula) situa-se na altura do equador; ela divide a Terra em dois hemisférios magnéticos.

Os pólos magnéticos apresentam ligeiro deslocamento em relação aos pólos geográficos.

As isógonas são mais complicadas. O lugar dos pontos de *declinação nula* é uma linha sinuosa que faz a volta da Terra. Essa linha separa um hemisfério atlântico onde a declinação é *oeste* de um hemisfério pacífico onde a declinação é *leste*.

Em resumo, nosso planeta se comporta como um ímã gigantesco cujo campo constitui o campo magnético terrestre.

A forma desse campo magnético é bastante complexa mas, numa primeira aproximação, pode-se considerar que

ele é idêntico ao de um dipolo (2) situado no centro da Terra, orientado do pólo norte ao pólo sul e cujo eixo não coincide exatamente com o eixo de rotação da Terra.

O paleomagnetismo

Antes de expor os resultados obtidos por essa disciplina, ainda muito recente, vamos esclarecer algumas definições.

A maioria dos corpos, colocados num campo magnético, adquirem as propriedades de um ímã. A seguir, quando se suprime o campo, essa imantação pode tanto desaparecer (para os corpos para- e diamagnéticos), como persistir (para os corpos ferromagnéticos ou "ímãs permanentes"). Os corpos ferromagnéticos não são suscetíveis de guardar sua imantação permanente se-

---

(2) *Dipolo:* Conjunto formado por duas cargas magnéticas pontuais, iguais e de sinais contrários, situadas a pequena distância.

não abaixo de uma temperatura bem definida chamada *ponto de Curie*. Acima dela, a substância se torna paramagnética.

As rochas vulcânicas que se espalham pela superfície da Terra têm uma temperatura elevada, perto de 1.000°C. Por ocasião do resfriamento, os minerais ferromagnéticos, ultrapassando seus pontos de Curie respectivos, guardam a direção de imantação do campo magnético terrestre a que se submeteram. De certo modo a lava "guarda a lembrança" do campo terrestre contemporâneo a seu extravasamento. Essa imantação é chamada termo-imanente. As rochas vulcânicas antigas permitem, pois, reencontrar o campo terrestre que reinava no momento de seu advento.

Assim as medidas de paleomagnetismo permitem ter uma idéia do campo terrestre médio que reinou durante um período de vários séculos.

As "migrações do pólo"

O campo magnético terrestre parece ter sido no passado comparável ao campo dum dipolo geocêntrico.

Inversamente, resulta disto que basta medir a imantação média de um período geológico para determinar aproximadamente a posição do eixo geomagnético do globo na época considerada.

O campo magnético sofreu enormes variações. Para começar, o sentido do campo terrestre se inverteu inúmeras vezes; em seguida, a direção média desse campo variou muito. Por outras palavras, o eixo dos pólos se deslocou no curso dos tempos, a menos que sejam os continentes que tenham mudado de lugar, ou ambas as coisas ao mesmo tempo.

As posições encontradas para o pólo magnético diferem segundo as medições sejam efetuadas a partir das rochas da Grã-Bretanha ou da América do Norte. Como o pólo não tinha senão uma única posição numa época dada,

são, portanto, os continentes que não tinham as posições que atualmente ocupam. Um tal movimento relativo é uma comprovação da "deriva dos continentes."

A magnetosfera

São designadas por esse nome as regiões da atmosfera mais distanciadas da superfície e que sofrem a influência do campo magnético terrestre. O meio ambiente é essencialmente composto de partículas carregadas.

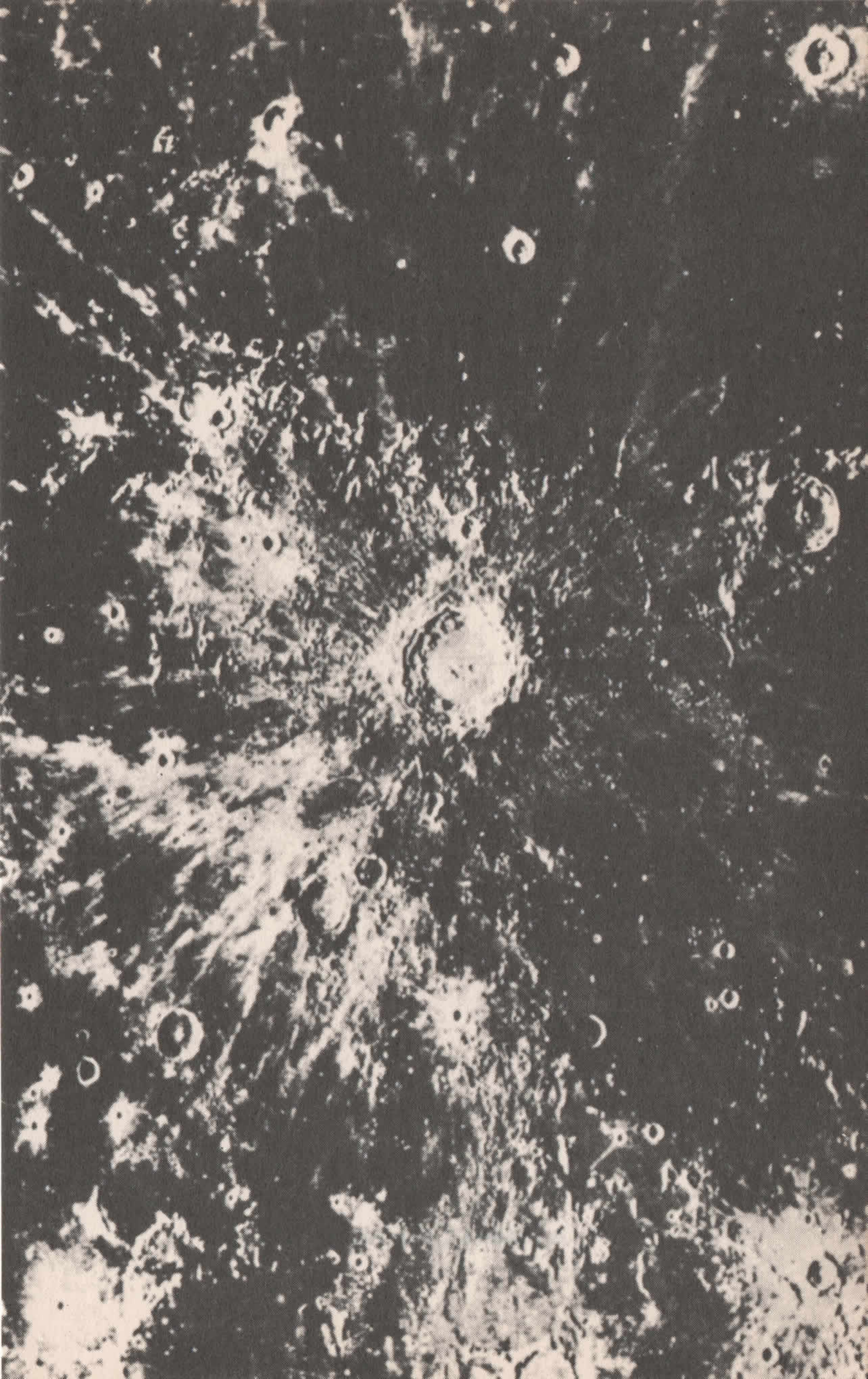
O limite extremo da magnetosfera é muito bem definido, salvo na direção oposta à do Sol. Do lado do Sol, há compressão do campo terrestre pelo vento solar, fluxo de partículas emitidas permanentemente por este. A magnetosfera fica nitidamente delimitada por uma superfície chamada *magnetopausa*, situada aproximadamente a 60.000 quilômetros, precedida ela própria de uma gigantesca "onda de choque" que forma uma bainha na qual se escoam as partí-

culas do vento solar.

Na direção oposta à do Sol, o campo magnético não mais apresenta a forma simétrica correspondente a um campo dipolar. Os dois feixes de linhas de forças das calotas polares se estiram para formar a cauda da magnetosfera que foi observada a até mais de 6 milhões de quilômetros.

A estrutura da cauda da magnetosfera é ainda mal conhecida, do mesmo modo que os mecanismos responsáveis pela sua formação.

História da Terra

Para retraçar a história da Terra, o problema fundamental que se coloca é o do conhecimento da ordem na qual os fenômenos se sucederam no tempo. Utiliza-se para esse fim a escala estratigráfica clássica que é, essencialmente, uma *escala relativa,* pois se fixa bem a ordem da sucessão dos acontecimentos da história terrestre, não dá nenhuma

A cratera Copérnico na Lua.

indicação sobre sua duração em tempo absoluto.

A paleontologia
(de paleo, **antigo e** ontos, **ser)**

Paleontologia é a ciência dos fósseis. O estudo dos fósseis é a base das pesquisas sobre a sucessão geológica dos acontecimentos. Paleontologia e geologia histórica são ciências estreitamente ligadas.

A primeira delas experimentou um surto de progresso no fim do século XVIII, mas, em todos os tempos, os homens se interessaram pelos fósseis.

Os filósofos gregos, muitos séculos antes de Cristo, tinham descoberto conchas marítimas muito longe das praias. Ovídio escreveu: "Vi terras que haviam saído do seio das ondas; bem longe do mar havia conchas marítimas."

Entretanto, os ossos de grandes animais eram tomados por ossadas de gigantes.

Tertuliano, nascido em Cartago em

155 d.C., assinala a presença de conchas marinhas nas montanhas. Acredita que toda a Terra já foi coberta pelas águas.

Por volta do ano 1000, os filósofos árabes reconheciam a verdadeira natureza dos fósseis.

Na Idade Média, Alberto, o Grande (1193-1280) explica o significado das pedras com formato de animal como os elementos do corpo transformados em pedra pelo poder mineral. Sem dúvida é ele o primeiro a compreender a presença de numerosas conchas nas pedras de construção utilizadas em Paris.

Mais tarde, Leonardo da Vinci (1451-1519) compara as conchas fósseis aos moluscos que vivem atualmente.

Bernardo Palissy (1510-1590) identifica conchas provenientes de diversas províncias francesas e faz uma distinção entre fósseis marinhos e fósseis lacustres.

Pouco a pouco, a paleontologia se desenvolve. Os grão-senhores e os mecenas geralmente possuem belas coleções desses objetos "exóticos".

Entretanto, muitos não acreditavam nos fósseis que para eles continuavam a ser "brinquedos da natureza". O próprio Voltaire pensava que as conchas de ostras achadas nos Pirineus tinham sido ali abandonadas pelos romeiros a caminho de Saint-Jacques de Compostelle.

Graças aos esforços de Buffon (1707-1788) e de Cuvier (1769-1832), a paleontologia torna-se uma verdadeira ciência e a natureza dos fósseis é universalmente reconhecida.

A *fossilização* é um fenômeno excepcional. O cadáver de um ser vivo desaparece muito depressa: é comido pelos predadores necrófagos ou entra em decomposição. Mesmo as partes duras com o tempo se dissolvem. Somente os cadáveres protegidos dos micróbios de fermentação e da putrefação são suscetíveis de ser conservados.

Pode haver conservação de cadáveres inteiros ou somente das partes duras e mineralizadas. Às vezes, trata-se de moldes e marcas ou ainda de pistas de animais ou de vestígios de

pegadas...

Os fósseis permitem muitas vezes precisar as condições de formação das rochas sedimentares. A *facies* de uma rocha é o conjunto dos caracteres petrográficos (de *petro,* pedra) e paleontológicos que permitem reconstituir essas condições.

Cronologia relativa
(cf. tabela no fim do capítulo)
Formações sedimentares

Essa cronologia relativa levou muito tempo para ser estabelecida. Isso só foi possível respeitando certo número de princípios fundamentais.

Princípio de superposição: na ausência de reviravoltas tectônicas, uma camada sedimentar é sempre mais recente do que a que ela cobre. A aplicação desse princípio supõe que as camadas não sejam depositadas horizontalmente e que nenhuma deformação tenha vindo perturbar a ordem original das camadas. Supõe ainda camadas no

local, chamadas *normais*. Para julgar se as camadas são normais ou invertidas, o geólogo de terreno dispõe de critérios de polaridade:

A granuloclassificação vertical: quando da formação de um depósito detrítico, as partículas mais encorpadas se depositam primeiro; elas indicarão assim a base da camada. Advirta-se desde logo que se trata de um critério que tem apenas um valor estatístico.

Fósseis em posição de vida: isto é válido principalmente para as formas animais fixas. Nesse caso, os fósseis conservaram na camada que os encerra a posição que tinham quando vivos.

Princípio de continuidade: segundo o qual, de modo geral, uma camada limitada por um teto e um piso e definida por uma *facies* dada tem a mesma idade em todos os seus pontos.

Acabamos de dar um sucinto apanhado geral de paleontologia.

Poder-se-ia ainda perguntar qual o valor de um fóssil e em que ele contribui à noção de cronologia?

Os fósseis mais interessantes são os

fósseis *estratigráficos,* isto é, os de grande distribuição geográfica e que permitem estabelecer correlações sobre superfícies muito extensas. Os que, ao mesmo tempo, povoaram o meio de formação do sedimento durante um curto lapso de tempo, pela escala geológica evidentemente! Nesse caso, diz-se que eles têm uma pequena extensão vertical.

Formações eruptivas

A aplicação de todos os princípios que acabamos de enunciar não é mais possível: as formações eruptivas não são *estratigráficas;* além do mais, não encerram jamais fósseis. A data de sua formação não pode ser conhecida a não ser considerando suas relações com as formações sedimentares que as cercam.

A escala de tempo que se pode assim estabelecer funda-se sobre acontecimentos biológicos: aparecimento ou desaparecimento de animais e vegetais. As idades dos terrenos são expressas

umas em relação às outras e sem unidade de tempo.

Cronologia absoluta

Neste caso, utilizam-se métodos físicos aplicáveis sobretudo às rochas eruptivas e metamórficas, mais raramente às rochas sedimentares.

Elas permitem o estabelecimento de uma escala em que as idades são expressas com uma unidade de tempo: em geral, o milhão de anos.

Antes de entrar nos detalhes da técnica, convém recordar rapidamente a história desse ramo da ciência.

O fato essencial é que as medidas precisas do tempo geológico se desenvolveram paralelamente ao estudo da radiatividade natural. Tudo começou por acaso quando o físico Henri Becquerel (1852-1908) deixou largada numa gaveta uma chapa fotográfica bem embrulhada, ao lado de sal de urânio. Quando foi buscá-la, achou-a velada. Tinha, portanto, sido exposta a uma

radiação desconhecida. Esse incidente fortuito abriu a Becquerel e a seus contemporâneos uma vereda que conduzia a grandes descobertas...

A estrutura do átomo

Um átomo é a menor partícula de um elemento que existe no estado livre ou combinado. A física moderna revelou sua complexa estrutura, da qual participam partículas ínfimas, *prótons* (partículas carregadas positivamente) e *nêutrons* agrupados no núcleo, em torno do qual gravitam os *eléctrons* (partículas de carga negativa).

O átomo é eletricamente neutro.

Cada elemento químico A é definido por dois números: Z ou número atômico que corresponde ao número de prótons que o núcleo contém, ou ao número de eléctrons; M ou número de massa que corresponde à soma dos prótons Z e dos nêutrons, sendo estes as únicas partículas pesadas do átomo.

Este elemento é escrito assim: ${}^{M}_{Z}A$.

Dois corpos que têm o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons são chamados *isótopos*. Eles têm propriedades químicas idênticas mas massas atômicas diferentes.

A geocronologia absoluta é o conjunto dos métodos de datação dos minerais e das rochas pelas técnicas baseadas na desintegração radiativa de elementos instáveis.

Um elemento radiativo possui a propriedade de se transformar espontaneamente num outro elemento de natureza química diferente e essa transformação é acompanhada da emissão de partículas:

— *partículas* α que são núcleos de hélio ($^4_2H^{2+}$) dando uma irradiação pouco penetrante e de carga positiva;

— *partículas* β que são eléctrons criando uma irradiação mais penetrante, de carga negativa ($-^0_1e$);

— *fótons:* é a irradiação γ muito penetrante.

O número de núcleos instáveis N diminui com o tempo, ao passo que o dos núcleos estáveis que deles resulta

aumenta simetricamente.

Chamamos T ao tempo necessário para a massa inicial M de núcleos instáveis N *diminuir de metade.*

Existem três grandes grupos de elementos radiativos naturais, presentes nos minerais:

— Família do urânio-tório que se transforma em chumbo;

— Potássio que se transforma em cálcio (Ca) e em argônio (Ar);

— Rubídio (Rb) que se transforma em estrôncio (Sr).

A esses três grupos, é preciso agregar o isótopo 14 do carbono que tem um período T muito breve mas que é interessante para datar os restos orgânicos que ainda encerram carbono. Esse isótopo se transforma em azoto com emissão de um eléctron.

Graças à radiocronologia, Holmes pôde, a partir de 1932, chegar a uma escala de tempo satisfatória. A que aqui é dada, aceita por todos, não sofrerá daqui em diante senão modificações de pouca importância; somente a cronolo-

gia do Quaternário ainda está sujeita a profundas revisões.

Idade da Terra

A idade das rochas mais antigas está situada em 3,7 bilhões de anos, mas esta não é a idade da Terra. Esta está avaliada em torno dos 4,7 bilhões de anos; que é também a idade da Lua e dos meteoritos.

A duração dos tempos fossilíferos é representada por perto de 600 milhões de anos.

Para melhor figurarmos a importância relativa dos tempos geológicos, admitamos por convenção uma duração de 365 dias para a vida de nosso globo. Isto equivale a atribuir a cada dia uma duração de 12,5 milhões de anos (segundo R. Brousse).

Para simplificar, supomos a idade da Terra como sendo de 4,56 bilhões de anos.

1.º de janeiro: nascimento da Terra

14 de novembro: nascimento do Primário

13 de dezembro: nascimento do Secundário

26 de dezembro: nascimento do Terciário

31 de dezembro: nascimento do Quaternário às 20 horas.

Como se pode ver, o que começamos a conhecer da história da Terra não representa senão ínfima fração de seu passado. Temos ainda um programa de 4 bilhões de anos para desvendar!

Marie-Ange SEVIN

QUADRO DOS TEMPOS GEOLÓGICOS

Eras	Períodos	Idades absolutas em milhões de anos
Quaternário	Holoceno Pleistoceno	2
Terciário ou Cenozóico	Plioceno Mioceno Oligoceno Eoceno Paleoceno	65
Secundário ou Mesozóico	Cretáceo Jurássico: Malm, Dogger, Lias Triássico	140 195 230
Primário ou Paleozóico	Permiano Carbonífero Devoniano Siluriano Ordoviciano Cambriano	280 345 395 435 500 570
Precambriano	Subdivisões locais	2.000 4.000

Planetas, estrelas e galáxias

Não se pode entender o universo" escreveu Galileu, "senão aprendendo a compreender sua linguagem e a decifrar seus caracteres. A linguagem é matemática e os caracteres são triângulos, círculos e outras figuras geométricas.

Três séculos depois, Einstein lhe responderá com estas palavras: "A natureza é de tal forma harmoniosa que às vezes podem-se deduzir fatos desconhecidos, fenômenos ainda não obser-

vados. E chega-se a eles com tal certeza que se pode esperar sem temor a confrontação com a experiência."

Planetas e estrelas

Quando observamos as constelações, elas nos parecem imóveis, de tal forma estão distante os objetos que as compõem. Contudo, há astros que se deslocam lentamente no meio das estrelas fixas. Os gregos os chamaram de *planetas*, isto é, "errantes". A olho nu, eles não se diferenciam das estrelas senão pelo seu movimento.

Os Antigos conheciam cinco *planetas,* cujo movimento segue o movimento aparente do Sol durante o anò através das constelações do zodíaco, isto é, a eclíptica.

Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, é visível na aurora e no crepúsculo. Às vezes é mais brilhante do que o Sol.

Vênus, visível nas primeiras horas da tarde e da manhã, é o planeta mais

luminoso.

Marte, Júpiter e Saturno são visíveis a noite inteira. Marte é vermelho-alaranjado; Júpiter e Saturno, amarelos.

Em plena noite, Júpiter é geralmente o astro mais brilhante, embora pareça mais amarelo do que Vênus ou Sírius.

A olho nu, as estrelas cintilam devido ao movimento das camadas de nossa atmosfera que agitam e varrem o raio luminoso proveniente de cada uma delas.

Os planetas distinguem-se das estrelas por não cintilarem. Sua irradiação, que é na verdade uma parte da irradiação solar refletida pelo planeta, nos atinge sob a forma de um feixe luminoso que praticamente não é afetado pela atmosfera.

Os instrumentos astronômicos permitiram descobrir e precisar as diferenças entre estrelas e planetas.

As estrelas são enormes massas gasosas no interior das quais se processam reações termonucleares. Elas estão muito afastadas de nós pois a luz leva 4,3 anos para chegar até nós de Alfa do

Centauro, a estrela mais próxima.

Os planetas, em contraposição, são corpos muito mais frios, alguns sólidos como a Terra, outros essencialmente gasosos como Júpiter.

O Sol

O Sol está situado a cerca de 150 milhões de quilômetros de nossa Terra que, num ano, descreve ao seu redor sua órbita. Essa órbita é uma elipse da qual o Sol ocupa um dos dois focos. A distância da Terra ao Sol varia, pois, regularmente: diz-se que ela está no *periélio* quando essa distância está em seu mínimo, e no *afélio* quando está em seu máximo.

Durante sua revolução ao redor do Sol, a Terra completa uma rotação em torno de seu eixo em 24 horas e arrasta em seu movimento orbital seu satélite, a Lua.

Os outros planetas também descrevem elipses em torno do Sol, ao mesmo tempo que giram sobre si mesmos; eles

podem ter satélites.

Essas órbitas são regidas pelas três famosas leis de Kepler:

1) são elipses de que o Sol ocupa um dos focos;

2) as áreas descritas pelo raio vetor são proporcionais aos tempos empregados para descrevê-las;

3) os quadrados dos períodos de revolução dos planetas são proporcionais aos cubos dos grandes eixos de suas órbitas.

Finalmente, as órbitas estão praticamente todas no mesmo plano; sua direção de revolução é a mesma; o Sol gira sobre si mesmo na mesma direção em que os planetas em torno de um eixo inclinado de 7.º em relação ao plano da órbita terrestre.

O pequeno mundo de nossos planetas

Distinguem-se nove principais planetas, ou "astros sem luz própria que giram em torno do Sol": Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno,

Urano, Netuno e Plutão. Nós os classificamos por ordem de distância crescente em relação ao Sol: Mercúrio é o mais aproximado dele e Plutão o mais distante.

Só os cinco primeiros são visíveis da Terra a olho nu. O esquema geral do sistema planetário é complicado pelos asteróides, multidão de corpos celestes secundários. A maioria deles circula por órbitas compreendidas entre as de Marte e Júpiter.

Certos planetas possuem um ou vários satélites: a Terra tem um, Marte dois, Júpiter 13, Saturno 10, Urano cinco, Netuno dois. Todos estes astros se estendem sobre mais de 12 bilhões de quilômetros e não está excluído que essa "superfície" aumente com a descoberta de novos planetas.

Mercúrio e Vênus estão mal "situados" para se proceder a uma boa observação, pois ficam muito perto do Sol. Como suas órbitas estão no interior da órbita terrestre, é evidente que eles podem interpor-se entre a Terra e o Sol.

Quando o Sol está entre nós e o

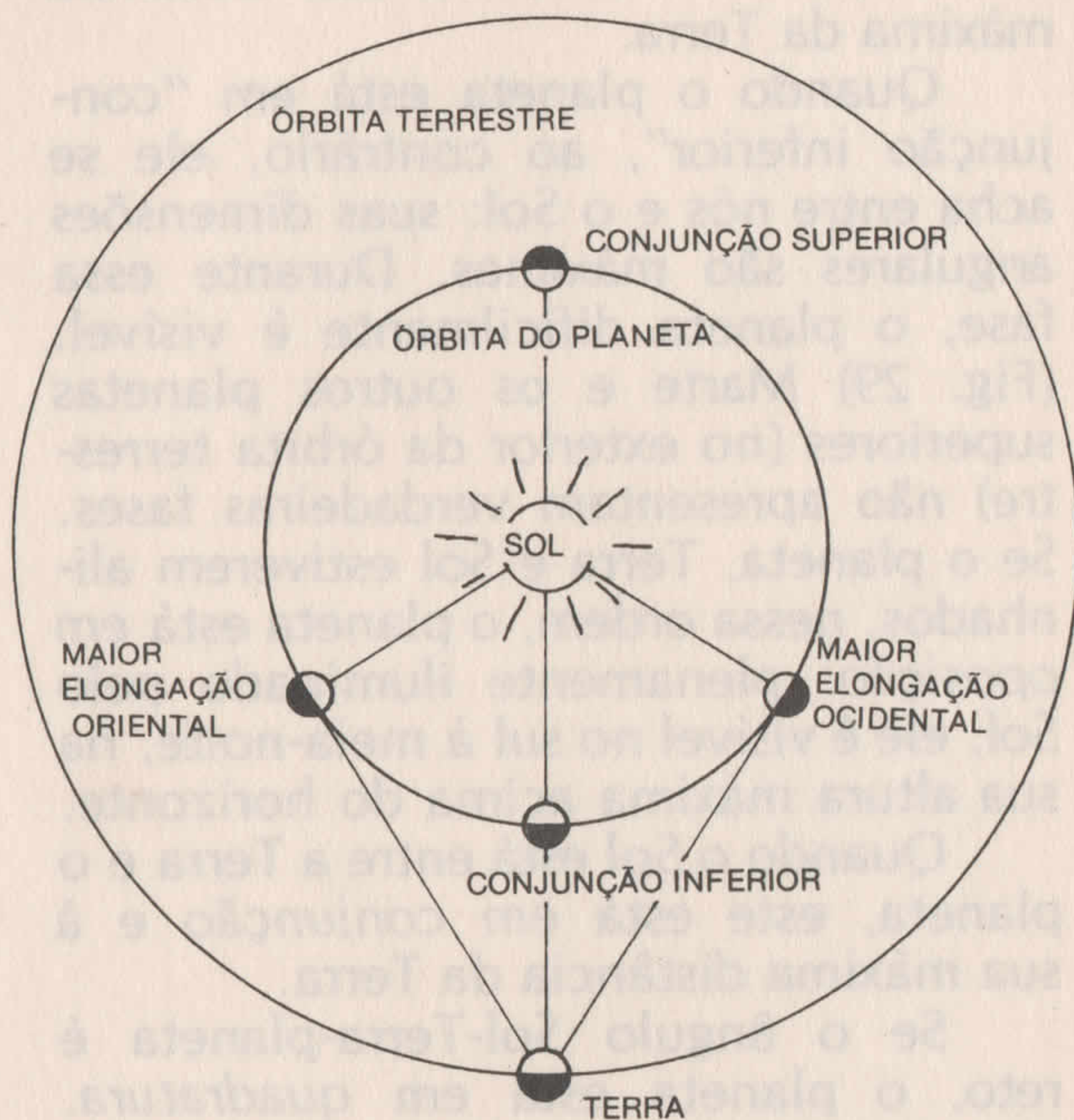



FIG. 29 — POSIÇÕES CARACTERÍSTICAS DE UM PLANETA INFERIOR.

planeta, dizemos que este se acha em "conjunção superior": ele aparece então como um pequeno disco todo ilu-

minado e se encontra a sua distância máxima da Terra.

Quando o planeta está em "conjunção inferior", ao contrário, ele se acha entre nós e o Sol: suas dimensões angulares são máximas. Durante essa fase, o planeta dificilmente é visível. (Fig. 29) Marte e os outros planetas superiores (no exterior da órbita terrestre) não apresentam verdadeiras fases. Se o planeta, Terra e Sol estiverem alinhados, nessa ordem, o planeta está *em oposição:* plenamente iluminado pelo Sol, ele é visível no sul à meia-noite, na sua altura máxima acima do horizonte.

Quando o Sol está entre a Terra e o planeta, este está *em conjunção* e à sua máxima distância da Terra.

Se o ângulo Sol-Terra-planeta é reto, o planeta está em *quadratura.* (Fig. 30) O intervalo compreendido entre duas conjunções ou oposições sucessivas se chama *período sinódico.* Este é sempre mais longo do que o período de revolução ou *período sideral,* pois no entretempo a Terra se desloca para o mesmo lado que o planeta.

CONJUNÇÃO

ÓRBITA DO PLANETA

ÓRBITA TERRESTRE

SOL

QUADRATURA ORIENTAL

TERRA

QUADRATURA OCIDENTAL

OPOSIÇÃO

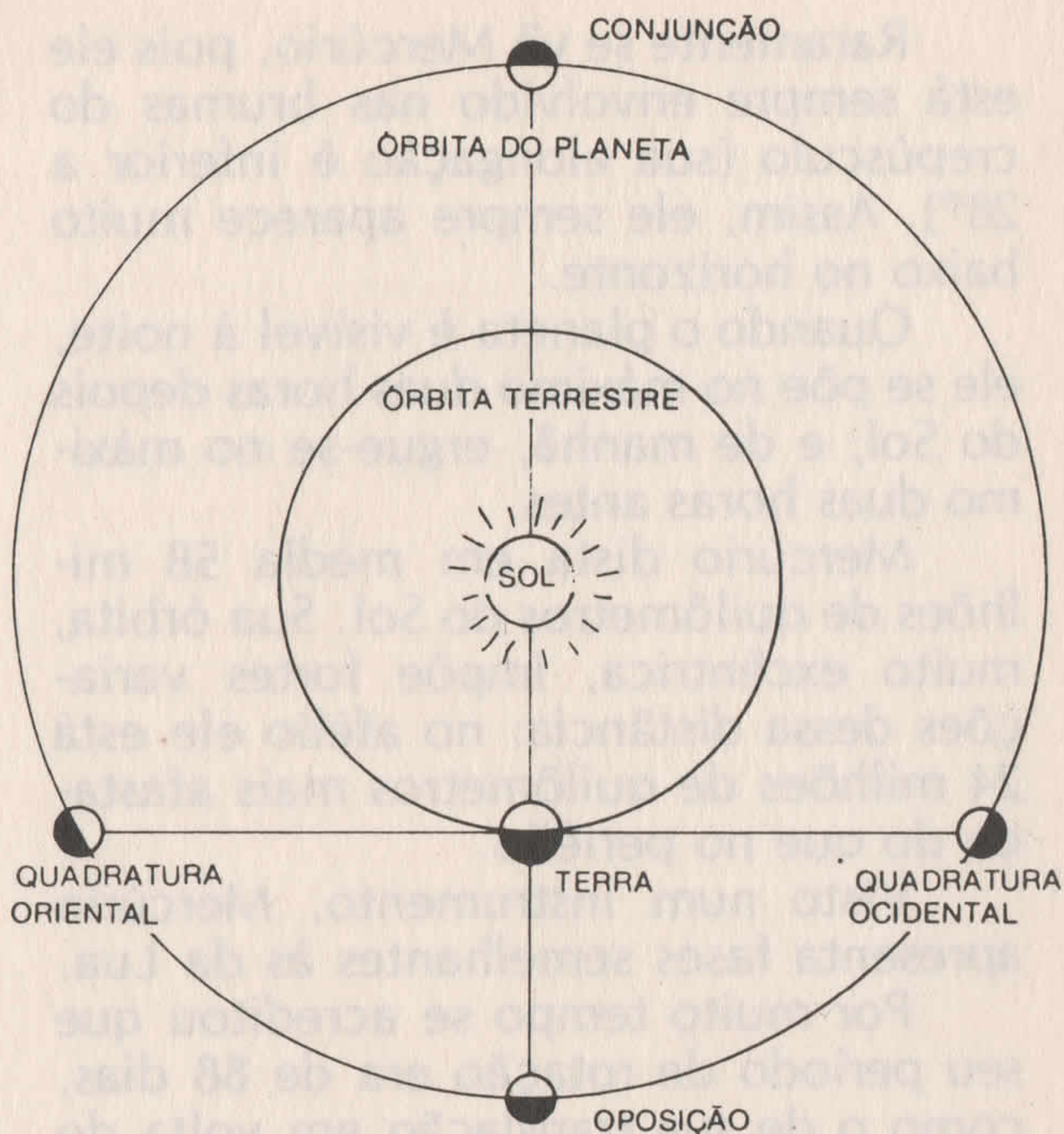



FIG. 30 — POSIÇÕES CARACTERÍSTICAS DE UM PLANETA SUPERIOR.

Mercúrio

Os Antigos o chamavam "o mensageiro dos deuses", devido à rapidez de seu curso.

Raramente se vê Mercúrio, pois ele está sempre envolvido nas brumas do crepúsculo (sua elongação é inferior a 28°). Assim, ele sempre aparece muito baixo no horizonte.

Quando o planeta é visível à noite, ele se põe no máximo duas horas depois do Sol; e de manhã, ergue-se no máximo duas horas antes.

Mercúrio dista em média 58 milhões de quilômetros do Sol. Sua órbita, muito excêntrica, impõe fortes variações dessa distância: no afélio ele está 24 milhões de quilômetros mais afastado do que no periélio.

Visto num instrumento, Mercúrio apresenta fases semelhantes às da Lua.

Por muito tempo se acreditou que seu período de rotação era de 88 dias, como o de sua translação em volta do Sol. Mas, em abril de 1965, graças ao radar, verificou-se que o planeta girava em 59 dias, ou seja, dois terços de seu período de revolução. A combinação desses dois elementos permitiu estabelecer que a noite e o dia em Mercúrio duravam 88 dias terrestres.

Mercúrio recebe sete vezes mais luz solar do que nós. Seu movimento é mais rápido que o dos outros planetas. Sua densidade — 5,4 — está compreendida entre a de Vênus e a da Terra. Quanto à sua massa, é a menor de todos os planetas.

No telescópio, Mercúrio aparece como um disco amarelo-pálido de contornos róseos. Sua superfície apresenta manchas sombrias e claras de aspecto imutável; o que indica, por um lado, que elas pertencem à superfície; e, por outro, que a atmosfera, se existe, deve ser tênue ao extremo, como seria de supor para planeta tão pequeno e tão próximo do Sol.

Nos fins de 1974; a sonda espacial Mariner 10, enviada pelos norte-americanos, passou a somente 700 quilômetros de Mercúrio e enviou-nos fotografias mostrando uma superfície coberta de crateras análogas às da Lua, isso porque a atmosfera — se é que podemos mesmo dar esse nome à delgada película gasosa que envolve Mercúrio — não é bastante espessa para frear a

queda dos meteoritos. O que é mais importante ela não pode propagar o calor e, entre a região que se encontra em face do Sol e a que lhe é oposta, a temperatura passa de cerca de 400°C a —180°C.

Vênus

Os Gregos o apelidaram de *Hesperos* e o representavam como uma soberba criança que, de noite, precedia a Lua segurando um archote. Para os Romanos, era *Vesper* e *Lucifer*.

Vênus é o astro mais brilhante depois do Sol e da Lua. Sua órbita é quase circular, inclinada 3°24′ sobre a eclíptica. Desloca-se em 225 dias por essa órbita à velocidade de 35 quilômetros por segundo, à distância média de 108 milhões de quilômetros do Sol.

Vênus, como Mercúrio, nunca está em oposição. Afasta-se no máximo a um ângulo de 48° do Sol. Em conjunção inferior, fica a cerca de 40 milhões de quilômetros da Terra e em conjun-

ção superior a 260 milhões de quilômetros.

A cada 584 dias, Vênus, a Terra e o Sol se acham mais ou menos na mesma posição, uns em relação aos outros. Como sua órbita fica no interior da órbita terrestre, Vênus apresenta durante esse período um ciclo de fases. (Fig. 31)

Galileu foi o primeiro a observá-las em 1610, confirmando assim o sistema de Copérnico. De fato, essas fases, semelhantes às da Lua, mas acompanhadas de variações nas dimensões angulares do disco, não são compatíveis com o sistema de Ptolomeu, para quem Vênus girava em volta da Terra, e portanto não deveria poder apresentar mudança de diâmetro angular.

Os períodos durante os quais Vênus é visível são muito longos, pois sua velocidade em sua órbita é um pouco superior à da Terra. A combinação dos dois movimentos orbitais faz surgir uma ligeira diferença na sucessão das fases: entre duas elongações, na aproximação da conjunção superior, as fases se sucedem lentamente. Em contrapartida, na

CONJUNÇÃO SUPERIOR

MAIOR
ELONGAÇÃO ORIENTAL

MAIOR
ELONGAÇÃO OCIDENTAL

CONJUNÇÃO INFERIOR

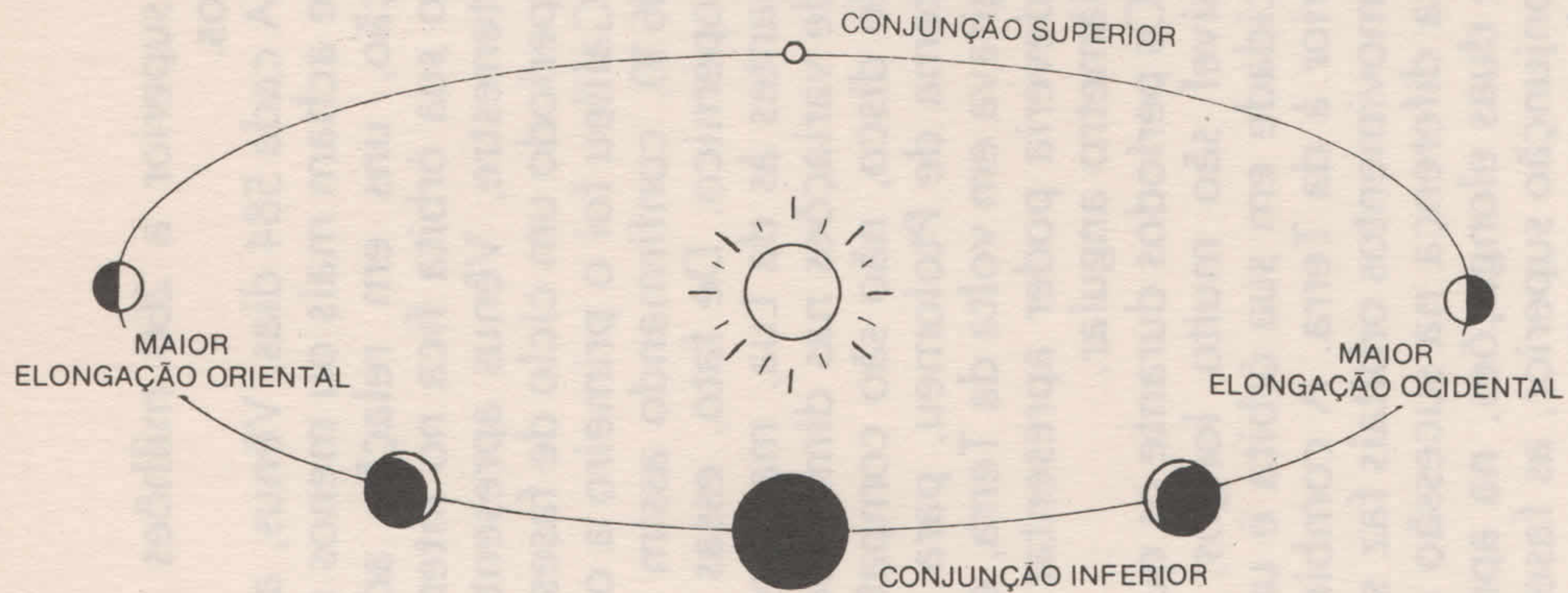



FIG. 31 — AS FASES DE VÊNUS.

conjunção inferior, elas se alternam com rapidez.

O diâmetro aparente de Vênus varia de 60" a 10" entre as conjunções inferior e superior.

Vênus é mais brilhante quando tem a forma de um delgado crescente e não quando todo o disco está iluminado, como se poderia supor *a priori*.

Sua massa e densidade são um pouco inferiores às da Terra e seu diâmetro é de cerca de 12.100 quilômetros. O *albedo* (relação entre a energia luminossa recebida e a refletida) é de 0,64. Ora, somente as nuvens e a neve têm tal poder refletor. Vênus, portanto, está envolta em espessa camada de nuvens que não deixam entrever, no telescópio, nenhum detalhe de sua superfície. Quando não está iluminada pelo Sol, apresenta uma fraca luminosidade que tem sido comparada à "luz acinzentada" da Lua.

Às vezes, divisam-se zonas escuras entre as nuvens. Os astrônomos têm procurado, baseando-se na passagem destas, deduzir o período de rotação,

mas os resultados nunca coincidem. Os resultados ópticos dão quatro dias, ao passo que os obtidos a partir de ondas radioelétricas no mesmo sentido indicam uma rotação de 243 dias retrógrada, isto é, na direção oposta à dos outros planetas.

Esse fenômeno, embora tenha levantado alguns problemas para os astrônomos, é bem fácil de interpretar. A rotação em quatro dias corresponde à parte visível do planeta, isto é, a camada nublada. É, portanto, a camada superior da atmosfera que gira em quatro dias. Por outro lado, as ondas de rádio atravessam a atmosfera e as medições feitas pelo radar fornecem assim o período de rotação da superfície do planeta. Em resumo: Vênus gira sobre o próprio eixo em 243 dias no sentido retrógrado, enquanto que sua atmosfera superior gira em quatro dias, sempre no sentido retrógrado.

O estudo espectral da atmosfera nos revelou que ela é essencialmente composta de gás carbônico; mas os conhecimentos que temos sobre as carac-

terísticas físicas e químicas de Vênus não remontam realmente senão ao momento em que começamos a estudá-la com engenhos espaciais.

Vênus é o primeiro planeta a ter recebido a visita de um engenho espacial. De fato, foi em dezembro de 1962 que a sonda Mariner 2 passou a 35.000 quilômetros e mediu sua temperatura no solo, que verificou ser da ordem de 400°C.

Essa temperatura muito elevada resulta da espessa camada nebulosa. Esta deixa passar a irradiação solar, que aquece o solo. Aquecido, o solo vai por sua vez emitir uma irradiação mas, sendo muito mais frio do que o Sol, irradiará no infravermelho que não poderá atravessar a camada de nuvens. (Fig. 32) Esse fenômeno, que explica a alta temperatura de Vênus, é bem conhecido na Terra: é o "efeito de serra", que tem a particularidade de nos permitir cultivar legumes em pleno inverno.

Numerosas sondas espaciais sucederam à Mariner 2. Em 1967, Vênus 4 pousava sobre aquele planeta e, duran-

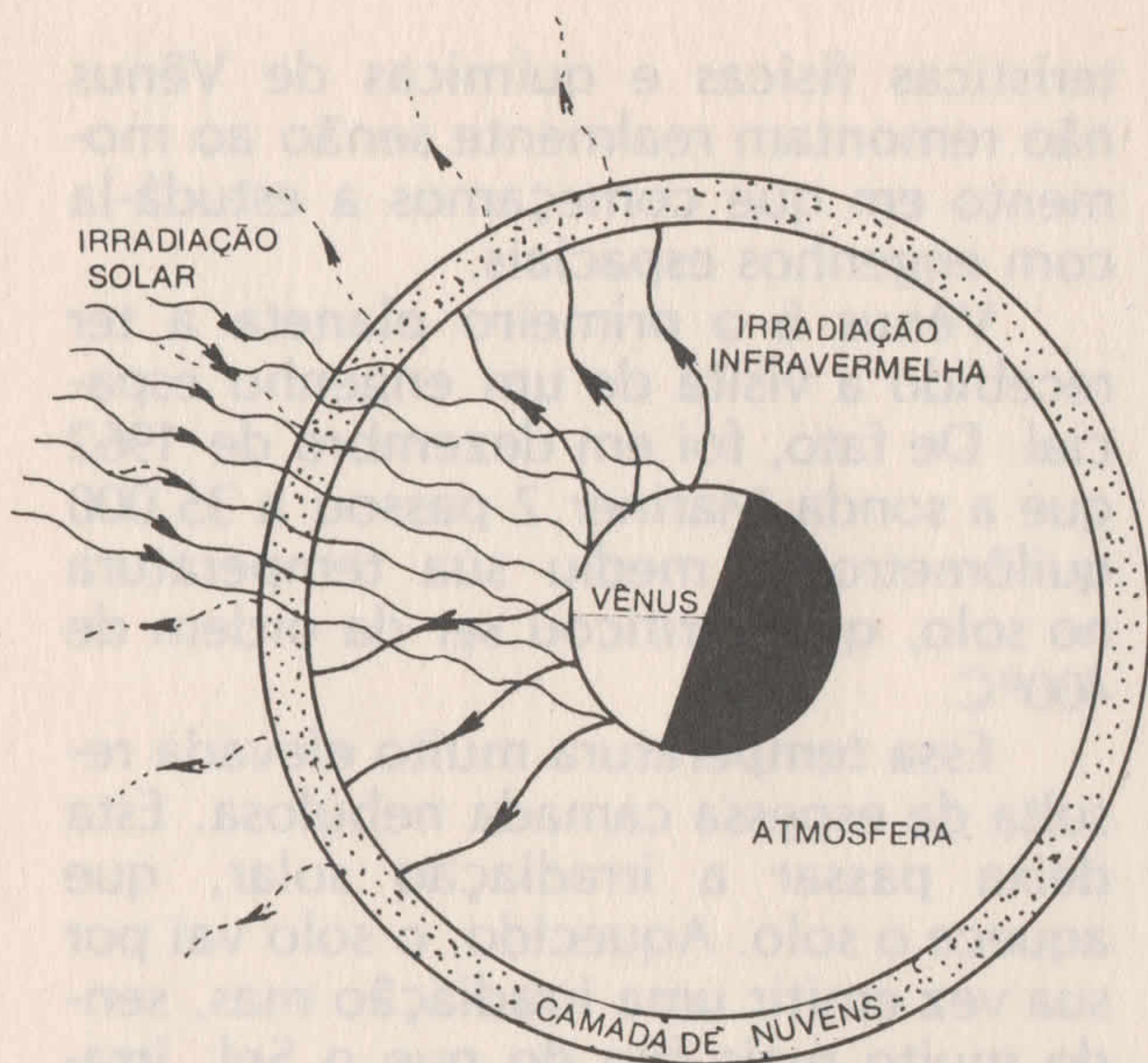



FIG. 32 — O EFEITO DE SERRA EM VÊNUS.

te os 94 primeiros minutos de sua descida de pára-quedas, transmitia informações. Depois seguiram Mariner 5, Vênus 5, 6, 7 e 8, Mariner 10, finalmente Vênus 9 e 10; cada uma dessas sondas vindo precisar e complementar as informações fornecidas pelas precedentes.

Observemos agora Vênus de um pouco mais perto, à luz destes novos conhecimentos.

Como dissemos, Vênus está cercado por espessa camada de nuvens que sempre dissimulam sua superfície e é a essa camada nublada que ela deve sua brancura ofuscante. Essas nuvens não são constituídas de água, como na Terra, mas sim basicamente de elementos corrosivos onde o ácido sulfúrico ocupa o primeiro lugar.

Debaixo da camada nublada, encontramos a atmosfera onde o gás carbônico domina com 97%, vindo a seguir traços de azoto, de argônio e de vapor de água. Ao nível do chão, a temperatura atinge perto de 500°C, isto é, um pouco mais do que havia medido a Mariner 2. A pressão atmosférica é ali 100 vezes mais alta do que na Terra; é isso que explica por que os primeiros engenhos que penetraram na atmosfera venusiana não puderam emitir durante muito tempo — eles foram simplesmente esmagados. Recordemos, a título de exemplo, que uma tal pressão corres-

ponde à encontrada na Terra a 900 metros sob a água, profundidade à qual nenhum submarino jamais desceu.

Com essas condições de temperatura e de pressão, suas chuvas de ácido sulfúrico, Vênus está longe de ser o planeta idílico que seu nome poderia deixar supor e compreende-se que se tenha abandonado a idéia de encontrar ali qualquer forma de vida.

O relevo de Vênus é ainda pouco conhecido. Estudos com radar demonstraram que o planeta não é absolutamente esférico e que apresenta formações elevadas, da ordem de quatro a cinco quilômetros.

As duas últimas sondas, Vênus 9 e 10, fotografaram o solo depois de pousar. Elas nos mostraram campos de pedregulhos, quando pensávamos numa superfície muito mais unida. Os pedregulhos apresentavam sombras, o que significa, por um lado, que a quantidade de luz que chega ao solo é mais considerável do que se imaginava e, por outro lado, que ela não é uniformemen-

te repartida, apesar da espessura das nuvens, o que é mais uma surpresa.

A Lua

Depois de deixarmos Vênus, continuando a nos afastar do Sol, encontramos um planeta azulado, listrado de nuvens brancas: é a Terra. Já falamos dela com prolixidade e não nos repetiremos. Ao redor da Terra gira um satélite de regular porte comparado ao de nosso planeta: a Lua.

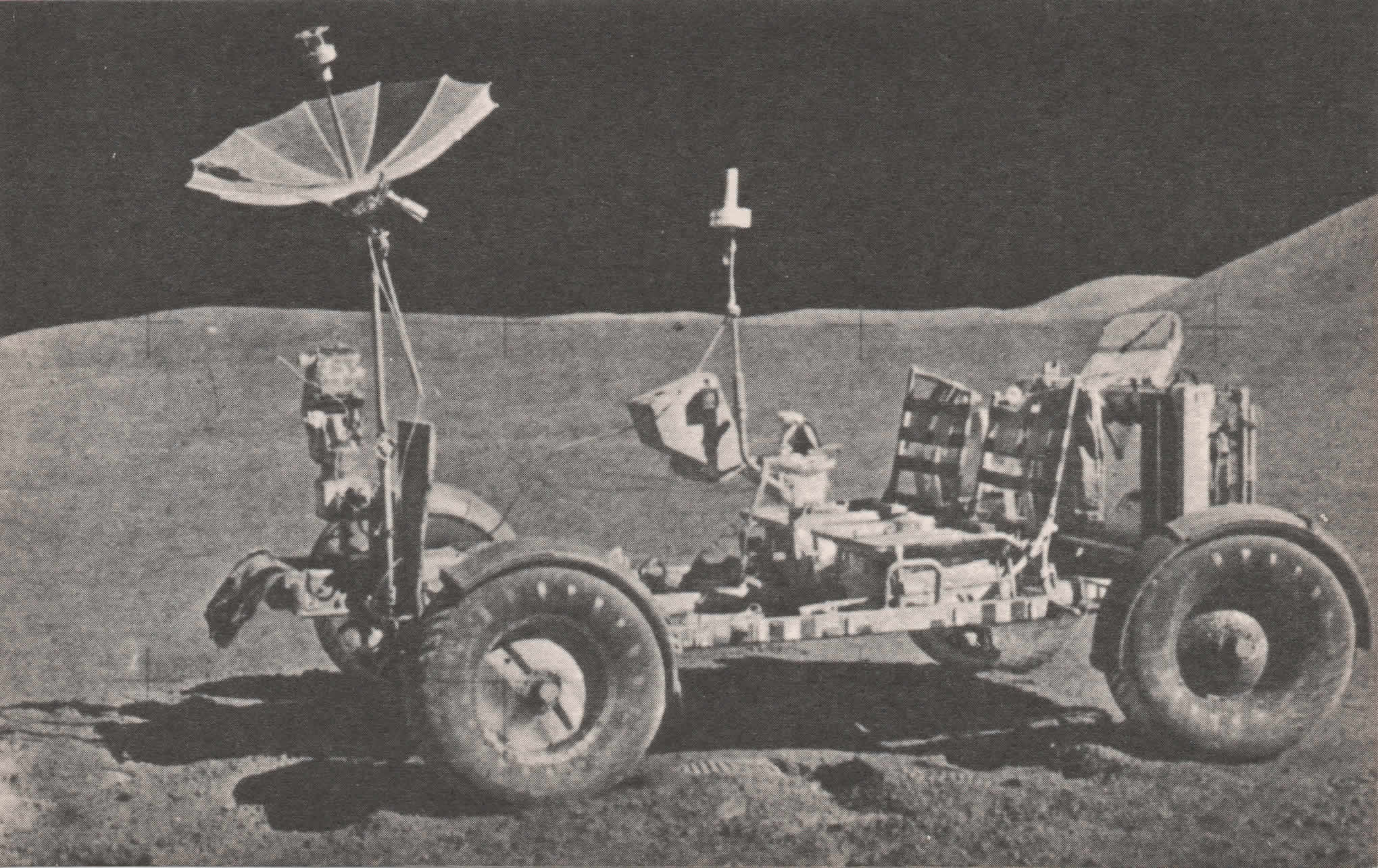
A Lua mede 3.480 quilômetros de diâmetro e sua massa representa 1/81 avos da massa da Terra. Existem satélites de outros planetas de porte e massa mais consideráveis do que os da Lua, mas tais satélites giram em torno de planetas muito maiores do que a Terra; assim, Ganimedes com seus 5.300 quilômetros de diâmetro não representa senão 1/12.500 avos da massa de Júpiter; e Titã, com 5.800 quilômetros, 1/4.700 avos da de Saturno.

A reduzida diferença entre as mas-

sas da Terra e da Lua tem levado às vezes a considerá-las não como um planeta e seu satélite, mas como um sistema duplo.

A Lua se acha em média distante da Terra 384.400 quilômetros, o que representa mais ou menos 30 diâmetros terrestres. A essa distância, nós a vemos sob um ângulo de meio grau.

O disco lunar, visto a olho nu, é pequeno portanto, não obstante é o objeto celeste mais luminoso depois do Sol; nele vemos manchas escuras e claras. Por analogia com a Terra, as manchas escuras receberam o nome de "mares" e as claras o de "continentes". Só bem mais tarde se soube que não havia água na Lua, mas como os astrônomos são gente conservadora, esses nomes ficaram.

Quando Galileu apontou pela primeira vez, em 1610, uma luneta para a Lua, descobriu montanhas e vales, bem como crateras. Desde então, fizemos muitos progressos, graças ao aperfeiçoamento dos meios de investigação que nos levaram até a trazer para a

Símbolo da conquista do espaço pelo homem, eis o "Rover" sobre o solo lunar.

terra fragmentos da Lua, para poder estudá-los com todo vagar.

Mas, não nos apressemos. Vamos primeiro examinar a sua superfície. Distinguimos nela pouco mais de uma vintena de mares que, segundo sua forma e extensão, tomam o nome de mares, oceanos, golfos, lagos ou pântanos.

A nomenclatura que usamos atualmente é devida a Riccioli e retrocede ao ano de 1651. Entre os mares principais citemos: o "mar das chuvas", o "oceano das tempestades", o "mar dos humores", o "mar das nuvens", o "mar da fecundidade", o "mar da tranqüilidade", o "mar das crises" e o "mar da serenidade".

As cadeias de montanhas tomam nomes emprestados das terrestres; encontramos assim entre elas os alpes, o cáucaso, os apeninos, os pirineus, etc.

O relevo lunar é essencialmente caracterizado por suas "crateras". São encontradas de todo porte, desde as menores, acessíveis aos instrumentos utilizado até as maiores que alcançam 250 quilômetros de diâmetro. Da super-

fície terrestre, os grandes instrumentos permitiram fazer o levantamento de cerca de 30.000. Desse número, 600 receberam um nome, geralmente de um sábio ou filósofo, de todos os países e de todas as épocas.

Essas crateras se elevam a alturas bastante consideráveis. A cratera Copérnico, que é uma cratera muito jovem situada entre o mar das chuvas e o oceano das tempestades, mede 90 quilômetros de diâmetro e suas paredes se erguem a 3.850 metros acima do fundo.

Desde sua descoberta, as crateras sempre colocaram um problema para os astrônomos: eram elas de origem vulcânica ou resultavam da queda de meteoritos? A solução veio somente com a utilização dos engenhos espaciais e voltaremos ao assunto mais adiante.

Todas essas formações pertencem à metade da superfície lunar, a única que podemos ver da Terra. De fato a Lua possui a particularidade de nos apresentar sempre a mesma face, o que significa que ela gira sobre si mesma exatamente à mesma velocidade com que

gira em volta da Terra. Essa rotação se efetua em 27 dias, sete horas e 43 minutos. A Lua não apresentou sempre a

DIREÇÃO DE UMA ESTRELA

SOL

2D 5H

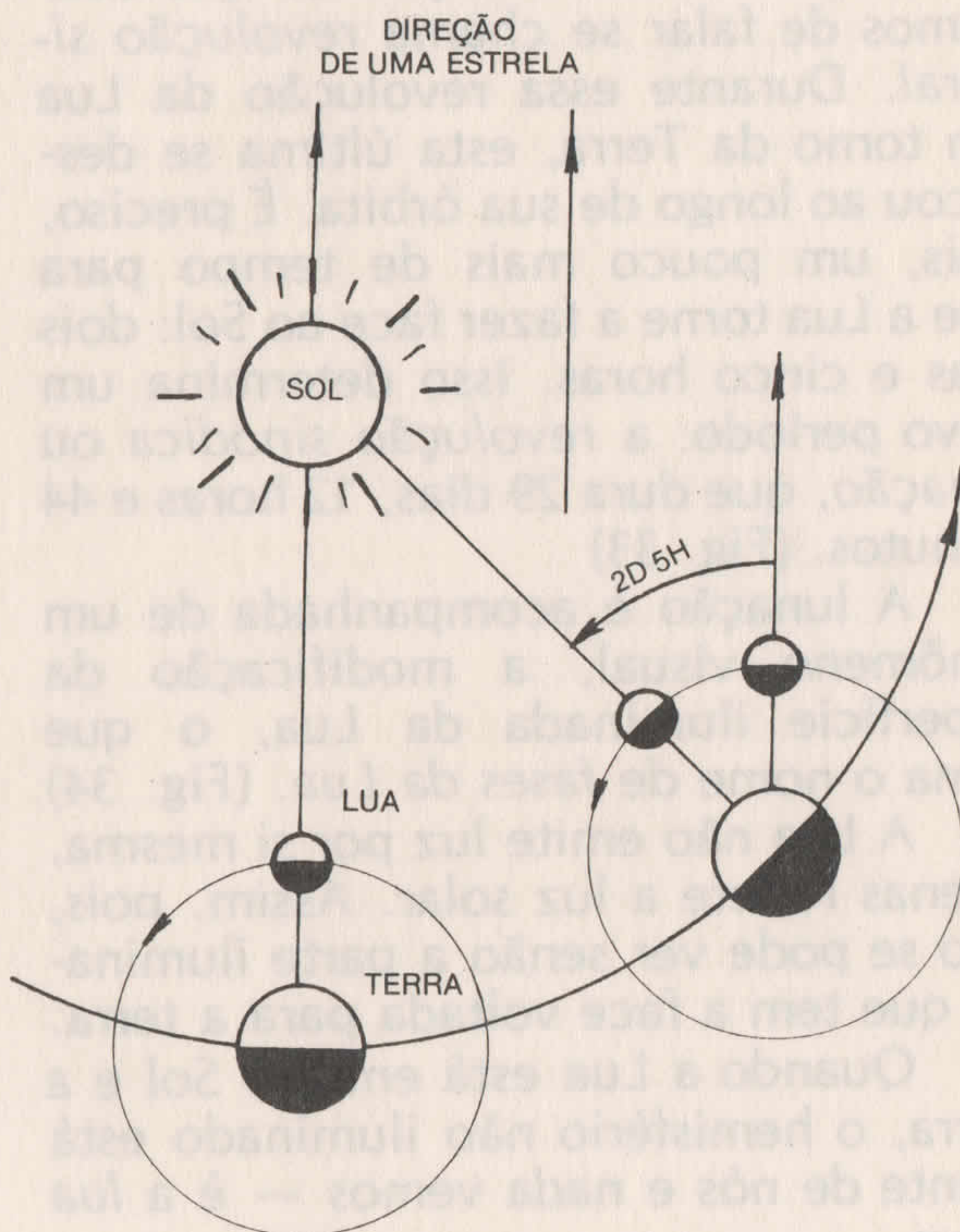
LUA

TERRA

FIG. 33 — DIFERENÇA ENTRE A REVOLUÇÃO SIDERAL DA LUA E A LUNAÇÃO.

mesma face à Terra; outrora, girava a uma velocidade diferente e foi sendo progressivamente freada pela força das marés que a Terra sobre ela exerce.

O período de rotação de que acabamos de falar se chama *revolução sideral*. Durante essa revolução da Lua em torno da Terra, esta última se deslocou ao longo de sua órbita. É preciso, pois, um pouco mais de tempo para que a Lua torne a fazer face ao Sol: dois dias e cinco horas. Isso determina um novo período: a *revolução sinódica* ou *lunação*, que dura 29 dias, 12 horas e 44 minutos. (Fig. 33)

A lunação é acompanhada de um fenômeno visual, a modificação da superfície iluminada da Lua, o que toma o nome de *fases da Lua*. (Fig. 34)

A Lua não emite luz por si mesma, apenas reflete a luz solar. Assim, pois, não se pode ver senão a parte iluminada que tem a face voltada para a terra.

Quando a Lua está entre o Sol e a Terra, o hemisfério não iluminado está diante de nós e nada vemos — é a *lua nova*.

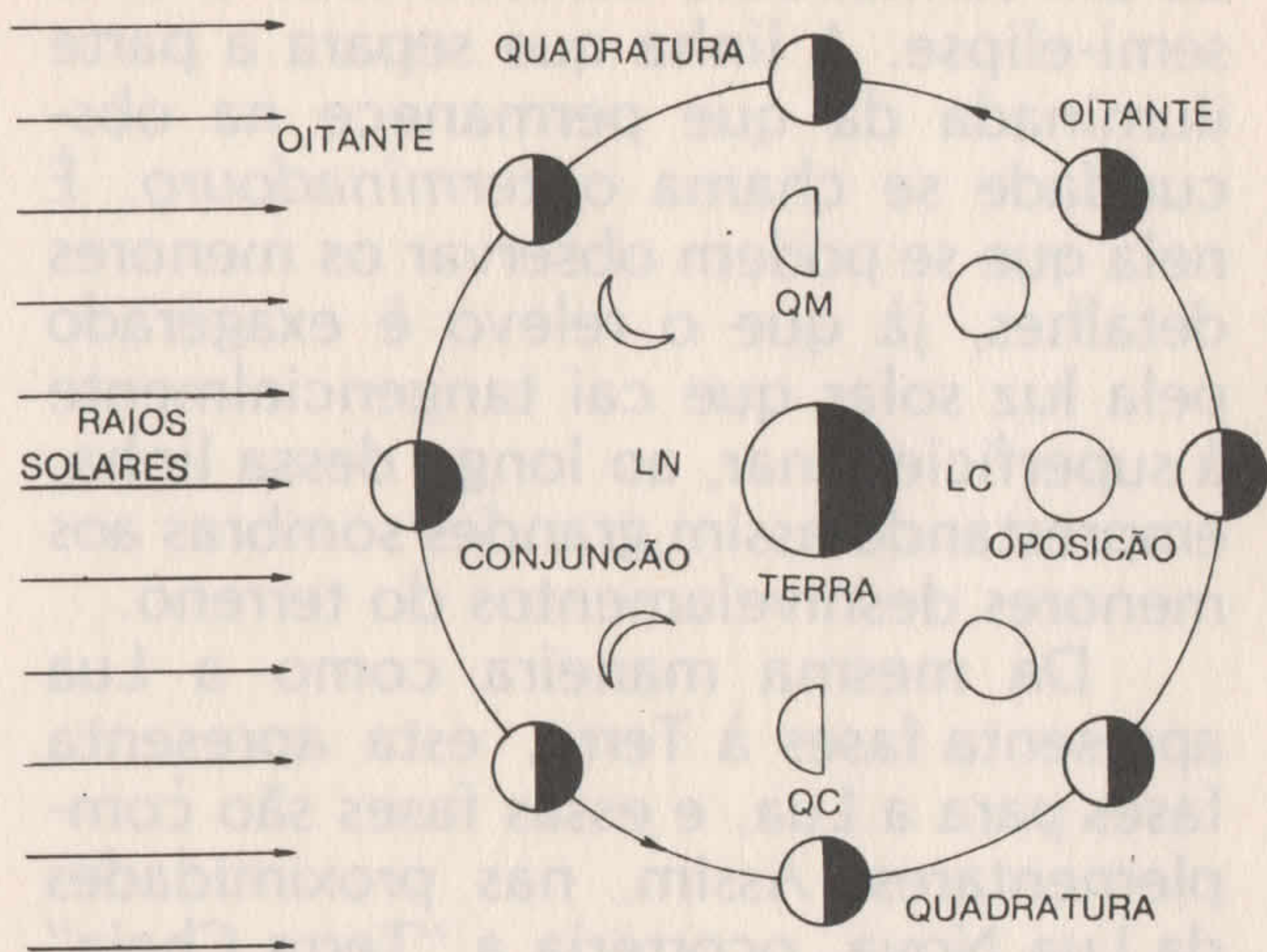



FIG. 34 — AS FASES DA LUA.

Mais ou menos uma semana depois, no *quarto crescente,* só a metade da Lua é visível. Mais uma semana, e é a *lua cheia,* seguida, após sete dias pelo *quarto minguante*. Finalmente, 29 dias e meio depois da lua nova, nosso satélite volta a estar de face para o Sol e é outra lua nova. Entre essas diversas fases principais, a Lua se apresenta ainda sob a forma de oitantes, isto é, formada

de um semicírculo acrescentado a uma semi-elipse. A linha que separa a parte iluminada da que permanece na obscuridade se chama o *terminadouro*. É nela que se podem observar os menores detalhes, já que o relevo é exagerado pela luz solar que cai tangencialmente à superfície lunar, ao longo dessa linha, emprestando assim grandes sombras aos menores desnivelamentos do terreno.

Da mesma maneira como a Lua apresenta fases à Terra, esta apresenta fases para a Lua, e essas fases são complementares. Assim, nas proximidades da Lua Nova, ocorreria a "Terra Cheia" quando a Terra, muito mais vasta e com maior poder de reflexão que a Lua, ilumina nosso satélite.

É por isso que, alguns dias depois da lua nova, por exemplo, distinguir-se-á não somente o crescente lunar, mas também o resto do disco se destacando num tom cinza sobre o fundo do céu. Esse fenômeno toma o nome de *luz acinzentada*.

Acontece a Lua passar entre o Sol e a Terra, ou ficar em oposição a esta.

Produz-se então um *eclipse,* do Sol no primeiro caso, e da Lua no segundo. (Fig. 35)

Se a Lua se deslocasse no plano da eclíptica, haveria um eclipse da Lua em cada lua cheia e um eclipse do Sol em cada lua nova, isto é, dois eclipses cada 29 dias e meio. De fato, o plano orbital da Lua e o da eclíptica fazem entre si um ângulo médio de 5°9′; portanto, os alinhamentos dos três astros não ocorrem a cada lua nova e cheia, mas somente quando a Lua se acha ao mesmo tempo no plano da eclíptica (de onde o nome desse plano). Essa condição suplementar limita o número de eclipses a sete por ano, no máximo.

Tornando-se um obstáculo aos raios solares, a Terra deixa atrás de si um cone de sombra e um cone de penumbra. Isto permite distinguir três tipos de eclipses lunares:

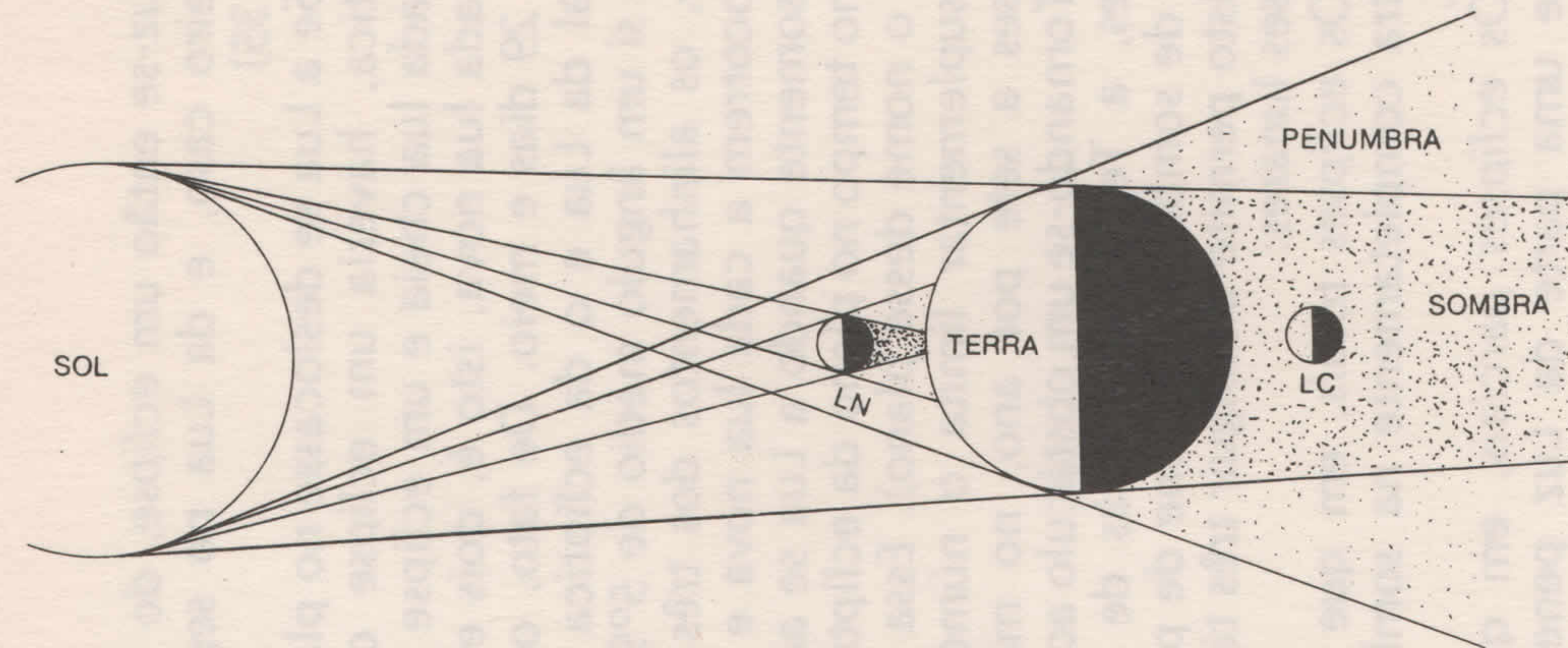
Os *eclipses totais*, em que a Luz penetra completamente na sombra da Terra.

Os *eclipses parciais,* em que somente uma parte da Luz penetra na

SOL

LN

TERRA

LC

PENUMBRA

SOMBRA

FIG. 35 — O FENÔMENO DOS ECLIPSES.

sombra.

Os *eclipses pela penumbra*, em que a Luz penetra completamente ou em parte na penumbra apenas.

Sigamos agora o desenrolar de um eclipse total. A Lua começa por penetrar na penumbra e toma uma coloração parda, depois atinge a sombra e se tinge de vermelho. É interessante observar que em pleno eclipse a Lua não desaparece de todo, se bem que se encontre no interior da sombra da Terra. É que intervém a influência da atmosfera terrestre; nossa atmosfera, por um lado encurva os raios luminosos e, por outro, difunde muito mais a irradiação azul do que a irradiação vermelha. Compreende-se assim intuitivamente que os raios encurvados que vão aclarar a Lua durante o eclipse sejam avermelhados. É pela mesma razão, diga-se de passagem, que o Sol é vermelho quando se encontra no plano do horizonte.

Os eclipses do Sol são caracterizados por uma circunstância extraordinária que faz com que os diâmetros

aparentes da Lua (ângulo sob o qual se vê a Lua da Terra) e do Sol sejam em média praticamente iguais. Mas as variações da distância Terra-Lua e da distância Sol-Terra permitem ao diâmetro aparente lunar ser ligeiramente superior ou inferior ao diâmetro aparente solar. Resultam três tipos de eclipses do Sol:

Os *eclipses parciais*, quando somente parte do Sol desaparece aos olhos do observador.

Os *eclipses totais* em que o diâmetro aparente da Lua, superior ao do Sol, recobre-o inteiramente. Pode-se então, na plenitude do eclipse, admirar a coroa solar, de ordinário dissimulada pela ofuscante luz emitida pela nossa estrela. Durante muito tempo os eclipses totais foram o único meio para se estudar a atmosfera solar. Não existisse essa coincidência aparente de porte entre o Sol e a Lua, nossos conhecimentos sobre o Sol se teriam desenvolvido muito mais lentamente e, conseqüentemente, nossos conhecimentos em astronomia não se poderiam comparar com o que eles são hoje em dia.

Os *eclipses anulares* em que, o diâmetro aparente da Lua sendo inferior ao do Sol, mesmo no máximo do eclipse apresenta um fino anel luminoso (daí o nome desse tipo de eclipses).

Advirta-se que, se os eclipses da Lua são vistos de maneira idêntica pelos observadores que têm a Lua acima do horizonte nesse momento, os eclipses do Sol, ao contrário, são vistos diferentemente nas diversas regiões da Terra em que o Sol já se tenha erguido.

A reprodução de um certo eclipse, que põe em jogo numerosos movimentos, poderia exigir um tempo demasiado longo. Mas, graças a outra circunstância, tão prodigiosa como aquela que há pouco mencionamos, os períodos de tais movimentos possuem um múltiplo comum que não é demasiado elevado. Efetivamente, um mesmo eclipse se reproduz a cada 18 anos e 11 dias. Esse período, que os Antigos já haviam notado, tem o nome de *Saros*.

Nosso conhecimento da Lua desenvolveu-se incrivelmente nos últimos anos, graças aos engenhos espaciais.

Seu estudo apresentava duplo interesse; por um lado, conhecê-la melhor e esperar assim derivar idéias novas sobre a Terra; por outro lado, como se trata do objeto celeste mais próximo de nós, testar as qualidades dos engenhos espaciais e preparar-se para vôos mais longíquos.

A 13 de setembro de 1959, o engenho espacial soviético Luna 2 espatifava-se no solo lunar, realizando a pri- ,eira ligação com nosso satélite.

Pouco menos de um mês mais tarde, a 7 de outubro, o Luna 3 contornava a Lua e mostrava-nos pela primeira vez com que se parecia a face oculta. As fotos recebidas na Terra nos parecem de qualidade bem fraca quando as olhamos hoje, mas elas põem já em evidência o fato de que as duas faces da Lua não são semelhantes. Se a face visível comporta aproximadamente 40% de mares, a face oculta possui somente um, o mar de Moscou, que não passa de vasta bacia de 300 quilômetros de diâmetro. Essa diferença fundamental entre as duas faces não re-

cebeu ainda explicação definitiva, mas não nos deve espantar; lembremo-nos simplesmente que na Terra, os continentes e mares, embora não tenham nenhuma relação com os lunares, são distribuídos diferentemente nos dois hemisférios.

A partir de 1964, os engenhos Ranger vieram nos fornecer novas informações sobre o solo lunar visto a pequena distância. Esses aparelhos iriam até a Lua, nela se esfacelariam e nos enviariam fotografias até o momento do impacto. Os Ranger VII, VIII e IX realizaram esse programa e nos enviaram 17.000 clichês, apresentando detalhes 1.000 vezes mais apurados que os até então observados. Esses clichês mostravam, sobretudo, que à medida que nos aproximávamos da Lua, distinguíamos novas crateras menores cuja distribuição permanecia idêntica à dos clichês precedentes. Uma tal constatação falava inequivocamente em favor de uma origem meteorítica e excluía a hipótese vulcânica. De fato, é fácil compreender que os meteoritos, sendo dos tamanhos

mais variados, vão cavar crateras de todas as dimensões, imbricadas umas sobre as outras.

A 31 de janeiro de 1966, a União Soviética lançava a sonda Luna 9, e a 30 de maio, os norte-americanos, a sonda Surveyor I. Esses dois engenhos, embora muito diferentes no aspecto, tinham a mesma finalidade: pousar suavemente sobre o solo lunar. As primeiras fotografias permitiam resolver o problema da consistência do solo lunar, que há muito tempo dividia os astrônomos. A superfície lunar não era coberta de centenas de metros de poeira como julgavam alguns, nem constituída de lavas sólidas como acreditavam outros; apresentava simplesmente uma natureza arenosa.

Surveyor V, VI e VII, os três últimos engenhos da série estavam munidos de instrumentos que permitiram as primeiras análises da composição do solo lunar. Os resultados obtidos mostraram que, nas regiões onde eles haviam pousado, esse solo se aproxima de nossos basaltos terrestres.

Depois da fase dos Ranger, que deviam espatifar-se sobre a Lua, e dos Surveyor, que pousavam suavemente, surgiram os Lunar Orbiter, satélites lunares com a missão de fornecer uma visão de conjunto da Lua. Deslocando-se a baixa altitude, eles permitiram, a partir de novembro de 1966, elaborar um mapa completo e detalhado da Lua, inclusive da face oculta. Precise-se que no ano precedente, em julho, a sonda soviética Zond 3 havia fornecido novas informações sobre a face oculta, mostrando especialmente que a concentração das crateras é nela mais alta do que na face visível.

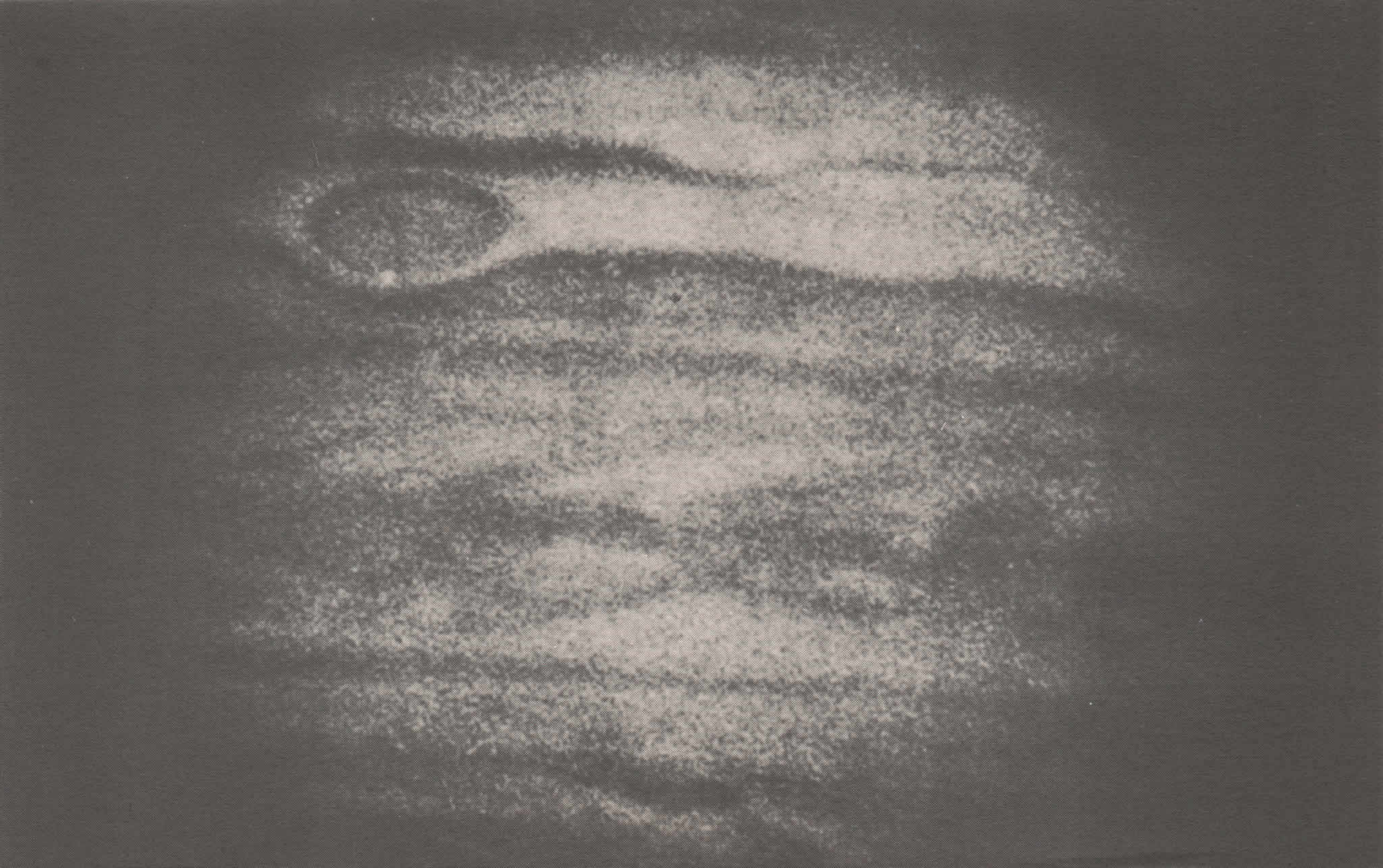
O estudo do movimento dos Lunar Orbiter permitiu verificar que a Lua não é um corpo homogêneo, mas apresenta anomalias de gravitação, as *mascon* (abreviação do inglês *mass concentrations*). Veremos mais adiante sua importância para a compreensão do relevo lunar.

Finalmente, a 20 de julho de 1969, o homem pousava na Lua; era o vôo Apolo XI. Armstrong e Aldrin pisavam

pela primeira vez na história da humanidade o solo de um outro planeta, enquanto Collins, que ficou a bordo do módulo de comando, girava sobre eles.

Os astronautas se entregaram a numerosos trabalhos durante as 21 horas e 36 minutos que passaram na superfície da Lua. Colheram 20 quilos de amostras do solo lunar, tiraram numerosas fotografias e dispuseram instrumentos, notadamente um sismógrafo e um refletor laser; prepararam também no local uma experiência destinada ao estudo do vento solar.

Depois do êxito dessa primeira missão, as seguintes registraram um aumento do tempo de trabalho na superfície da Lua, e o desenvolvimento de seus meios de investigações. As três últimas missões, Apolo XV, XVI e XVII, dispuseram de um veículo automotivo, o *lunar rover*, que lhes permitiu ampliar consideravelmente seu raio de ação, que passou de 60 metros para a Apolo XI a seis quilômetros para a Apolo XVII.

Em dezembro de 1972, depois do

Júpiter, o planeta gigante do sistema solar.

regresso da Apolo XVII, a exploração lunar representava mais de três dias de marcha em sua superfície, durante os quais uma centena de quilômetros havia sido coberta. Trezentos e oitenta e sete quilos de amostras tinham sido recolhidos e seis estações científicas estavam em funcionamento. O destrinçamento de todos os dados obtidos exigirá ainda muitos anos!

Durante esse período de intensa atividade norte-americana de exploração da Lua pelo homem, os soviéticos não ficaram inativos. Eles não desenvolveram um programa de vôos tripulados para nosso satélite, com certeza devido às dificuldades por eles encontradas nessa modalidade, mas se dedicaram à realização de sondas automáticas com possibilidades equivalentes. Essas sondas são particularmente interessantes pois seu custo total não tem comparação com o das missões Apolo.

As sondas Luna 16, em setembro de 1970, e Luna 20, em fevereiro de 1972, colheram amostras lunares e conseguiram voltar à Terra. As sondas Luna

17 e 21 transportaram à Lua dois veículos automáticos, Lunakhod I e II. A 17 de novembro de 1970, o Lunakhod I começava sua exploração lunar. Esse veículo, telecomandado da Terra, parece uma marmita de mais de dois metros de diâmetro, montada sobre oito rodas que possuem cada uma seu próprio motor elétrico. O conjunto pesa 756 quilos. O Lunakhod se movimentou durante 10,5 dias lunares na superfície de nosso satélite, parando durante a noite e reiniciando de dia. Em todo esse período, percorreu uma dezena de quilômetros, explorando uma vasta zona. Transmitiu umas 20.000 fotografias do solo lunar; procedeu à análise química do solo em cerca de 50 pontos e a mensurações físicas em 500 pontos.

A 16 de janeiro de 1973, o Lunakhod II continuava o trabalho começado pelo Lunakhod I com meios mais possantes.

Após esta breve recapitulação de acontecimentos que datam de apenas alguns anos, mas que já entraram para a história do mundo, vejamos como nós

atualmente representamos a Lua.

A Lua formou-se há cerca de 4,7 bilhões de anos, ou seja, tem a mesma idade que a Terra. A maioria dos especialistas pende para a hipótese de uma formação paralela da Lua e da Terra, uma na proximidade da outra. As antigas hipóteses que supunham que ela poderia ter sido capturada pela Terra, ou que se teria destacado de uma "Proto-Terra" (Terra em formação), vão sendo cada vez mais abandonadas.

As *mascons* de que falamos antes situam-se sob as regiões ocupadas por mares de forma circular, o que deu lugar a uma hipótese atraente para explicar a origem dos mares.

Pode-se pensar que quando a Lua era ainda muito jovem e sua crosta pouco espessa, enormes meteoritos perfuraram essa crosta. O material subjacente transbordou então pelas vias assim criadas e foi submergir vastas regiões ao redor dos pontos de impacto. Passados tempos, solidificou-se e passou a constituir os mares. O acontecimento que fez nascer o mar das chuvas

se produziu há perto de 3,9 bilhões de anos. Os outros mares são mais jovens e sua formação se escalona até há 3,1 bilhões de anos.

A Lua não tem atmosfera. Em conseqüência, não existe nela erosão, tal como a conhecemos na Terra, seu chão é essencialmente modelado pelos meteoritos de todo tamanho que ali cheguem. (Fig. 36) Trata-se pois de um solo

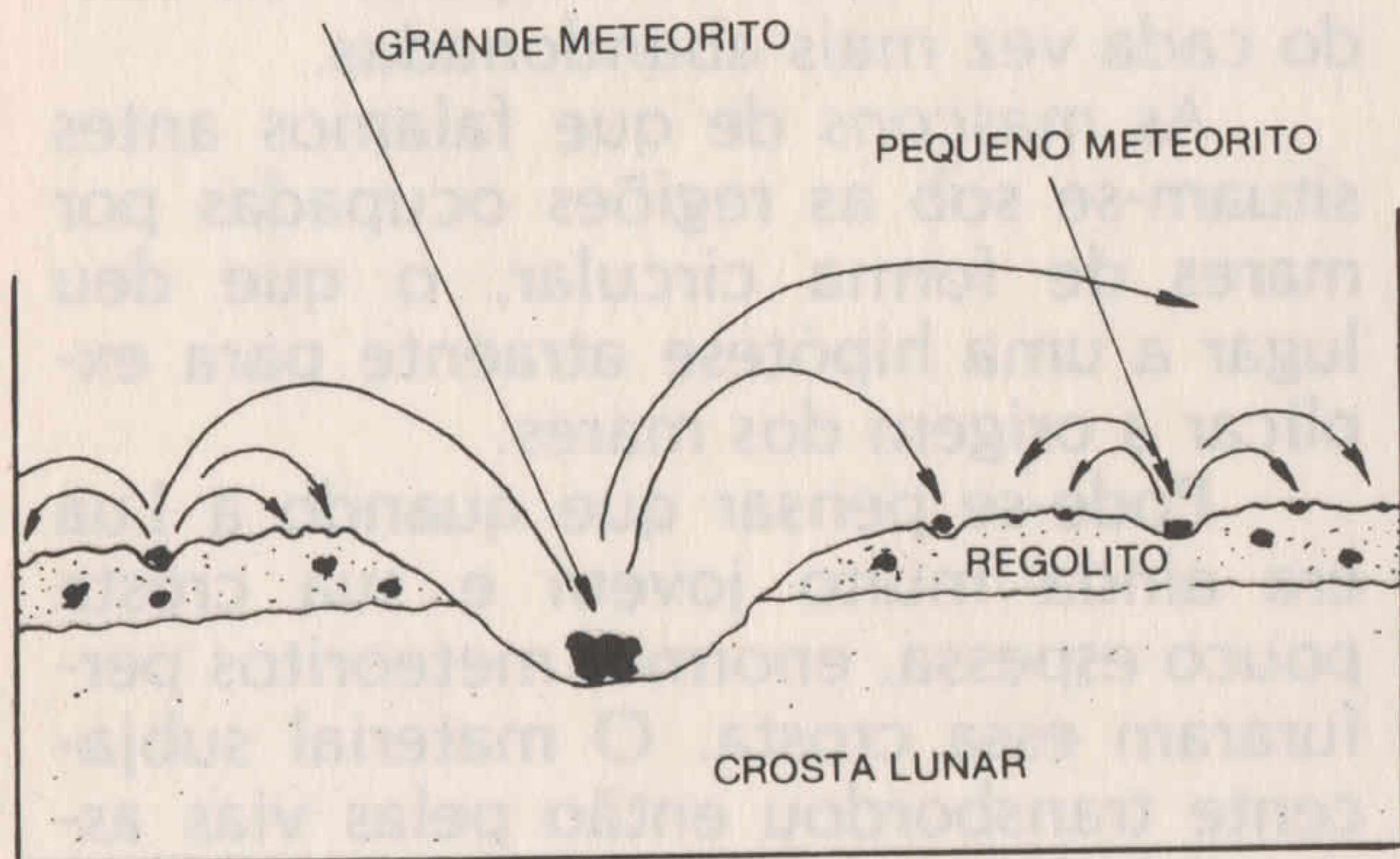



FIG. 36 — A FORMAÇÃO DAS CRATERAS LUNARES.
A FORMAÇÃO DOS MARES PODE SER EXPLICADA DA MESMA MANEIRA, SUPONDO-SE QUE, HÁ ALGUNS BILHÕES DE ANOS, ENORMES METEORITOS PERFURARAM A CROSTA E QUE BASALTO EXTRAVASOU POR ESSAS VIAS, DANDO ORIGEM AOS MARES.

muito fragmentado e continuamente remanejado. Encontra-se desde logo uma camada de poeira móvel, de alguns milímetros a alguns centímetros de espessura, recobrindo uma camada de rochas quebradas chamada "regolito" que se estende até vários metros de profundidade.

Em números aproximados, o solo lunar se compõe de:

58% de oxigênio
20% de silício
7% de alumínio
4% de cálcio.

As rochas lunares se diferenciam das rochas terrestres por seu alto teor em elementos refratários, como o titânio ou o zircônio, e sua pobreza em elementos voláteis, como o potássio e o sódio. O que indica que a Lua bem cedo perdeu seus elementos mais voláteis. Em essência, as rochas são *brechas*, aglomerados de finas partículas soldadas quando do impacto dos meteoritos, e *rochas ígneas*. Os mares são constituídos por *basaltos*, ao passo que os continentes, que representam, como

vimos, a antiga crosta da Lua, são constituídos pela *anortosita*, rocha clara composta essencialmente de silicatos.

A estrutura interna da Lua é muito comparável à da Terra. Nela se encontram uma crosta, um manto e um núcleo, mas em proporções muito diferentes de suas homólogas terrestres. A crosta teria cerca de 60 quilômetros de espessura e o manto se aprofundaria a seguir até cerca de 1.000 quilômetros.

Os sismógrafos colocados na superfície da Lua nos mostraram que sua atividade interna é muito fraca. A amplitude dos sismos corresponde precisamente ao limiar da percepção pelo homem. Os sismos ocorrem sobretudo quando a Lua está perto do perigeu (ponto da órbita mais próximo da terra); o que significa que é o efeito da maré que favorece seu desencadeamento. Os sismos se produzem a profundidades que variam entre 800 e 1.100 quilômetros, enquanto que na Terra a maioria ocorre nos primeiros 30 quilômetros. Logo, a Lua está muito mais próxima do equilíbrio do que a Terra.

Marte

Quando os primeiros instrumentos astronômicos foram apontados para Marte nos séculos XVII e XVIII, revelaram aos grandes astrônomos dessas épocas — Huygens, Cassini, Herschel — um mundo duas vezes menor do que a Terra, mas parecido com esta em muitos aspectos: dias de 24 horas e 37 minutos, pouco mais longos do que os nossos; um eixo de rotação inclinado de 25° em relação à perpendicular ao plano da órbita, o que importa uma sucessão de estações; calotas polares e nuvens; continentes avermelhados; e zonas mais escuras, que naturalmente foram consideradas como lagos ou mares. Numa palavra, um astro acolhedor onde a vida deveria florescer.

Aliás, naquela época, a hipótese de uma vida extraterrestre não chocava ninguém. Era antes de Darwin e das teorias de seleção natural e de evolução, antes que se descobrissem as leis do "acaso e da necessidade".

Entretanto, é no século XIX que

nasce "o caso dos canais de Marte", que fez surgir a maior das ilusões sobre a vida marciana.

Em 1877, o planeta apresentava boas condições de observação e o italiano Giovanni Schiaparelli acreditou ver, em seu instrumento de 20 centímetros de diâmetro, uma rede de linhas finas e escuras sobre a superfície de Marte. Chamou-as "canais" e não foi mais adiante.

Mas outro astrônomo aproveitaria a deixa: Percival Lowell, um norte-americano. Para ele, não restava nenhuma dúvida: Marte era habitado e os marcianos, lutando contra uma seca avassaladora, construíram uma rede de irrigação. A idéia, lançada em 1894, teve um eco retumbante graças aos escritores de ciência-ficção: H. G. Wells (*A Guerra dos Mundos*), Edgar Rice Burroughs, o criador de Tarzã, com o ciclo das aventuras de John Carter em Barsoom.

Foi preciso esperar 1930 e a publicação do livro do francês E. M. Antoniadi para que a polêmica dos canais terminasse: não passavam de ilusões de

ótica devidos à reduzida capacidade dos instrumentos astronômicos da época!...

Privado de seus canais, nem assim Marte ia deixar de ser assunto. Haviam observado formações azul-esverdeada ou verdes que se tornavam pardas no outono.

Na primavera, uma zona mais escura progredia devagar, a partir dos pólos, para reabsorver-se no fim do ano marciano. Acaso isto tudo não traduzia a evolução sazonal de uma vegetação? Foi o que se acreditou até o começo da década de 50.

As descobertas da Mariner 9

A explicação foi dada pela Mariner 9: a mudança de tonalidade é devida aos movimentos de poeiras sob o efeito de violentos ventos. Quanto ao verde, é uma ilusão de ótica: sabe-se que o cinzento, ao lado do vermelho, parece verde.

Portanto, Marte não tinha canais

nem vegetação. Mas será que seus satélites não eram artificiais, lançados por uma civilização passada? De fato Fobos, girando muito perto de Marte, parecia muito mais freado pela atmosfera marciana do que um objeto pleno. Mariner 9 confirmaria: Fobos não passa de um pequeno asteróide.

Seria pois Marte um planeta desértico, hostil?

★
★ ★

Já em julho de 1965 Mariner 4 havia transmitido as primeiras fotografias aproximadas de Marte: mostravam apenas crateras, criadas pelos impactos dos meteoritos.

Certamente se esperava, dada a fraca gravidade marciana, encontrar em volta do planeta vermelho uma atmosfera bem menos densa que a da Terra, 10 vezes menos com certeza. O que não se imaginava era um envoltório gasoso 100 vezes mais tênue do que a atmosfera terrestre.

Nessa atmosfera, composta basicamente de gás carbônico, os extremos da temperatura diária são de grande importância. Por outro lado, como a irradiação solar é duas vezes menos intensa do que na Terra, as temperaturas máximas são pouco elevadas. No verão, ao meio-dia no equador, elas não passam de 25°C e caem à noite, logo antes do alvorecer, a - 60°C. Registram-se temperaturas noturnas inferiores a - 100°C.

Portanto, faz muito frio em Marte e os raios ultravioletas solares, tão perigosos para os organismos terrestres, não sendo detidos por uma camada de ozônio, podem chegar até Marte.

A este quadro, deve-se acrescentar a ausência de água. Por muito tempo os especialistas pensaram que as calotas polares eram formadas de gelo e constituíam uma fonte de água para todo o planeta. Infelizmente, as sondas norte-americanas estabeleceram que elas eram compostas de gás carbônico gelado. Em meio século, portanto, haviase passado da concepção de um planeta

acolhedor, com canais e vegetação, a um quadro desolado, que não correspondia ainda à complexidade de Marte. A Mariner 9 revelaria um planeta geologicamente ativo e descobriu os vestígios de um clima passado muito mais clemente, de uma época onde rios cortavam a superfície marciana.

O passado misterioso de Marte

A Mariner 9 obtendo mais de 7.000 fotografias, há cinco anos, restabeleceu a realidade! Marte tem o maior vulcão e o maior *canyon* do sistema solar. O maior vulcão é Olympus Mons que se eleva a 25 quilômetros acima dos terrenos circundantes; tem 600 quilômetros de largura na base e possui uma cratera de 60 quilômetros de diâmetro.

O maior *canyon* é Valles Marineris: uma rede de fraturas que se estende por 2.700 quilômetros ao longo do equador marciano, atingindo às vezes 500 quilômetros de largura e seis quilômetros de profundidade.

O Olympus Mons, como os outros grandes vulcões, está atualmente extinto, mas atesta uma atividade geológica intensa em Marte num passado recente.

Outra descoberta da Mariner 9 colocaria novamente em debate o clima marciano: a das formações semelhantes a leitos de rios secos, a *oueds* (1).

Somente uma explicação parece satisfatória: era preciso supor que Marte fora um dia percorrido por rios, isso há alguns milhões de anos!

Entre as numerosas hipóteses, poderia supor-se que Marte vive hoje um período glacial. A maior parte de sua atmosfera se acharia congelada nas calotas polares, daí a fraca pressão atmosférica atual. Assim, a quase totalidade da água marciana estaria solidificada sob a forma de gelo no subsolo ou debaixo das calotas polares. A presença de água líquida na superfície de Marte durante os períodos climáticos cle-

---

(1) *Oued*: curso de água temporário no Saara. (*N. do T.*)

mentes leva a crer que a vida, se ela existe, se adaptou para sobreviver durante os intervalos glaciais.

Operação Viking

Um bilhão de dólares pelas duas sondas Viking. Cada uma delas pesa aproximadamente 3,5 toneladas e se compõe de duas partes com missões bem distintas: a primeira é o compartimento orbital ou *Orbiter* que assegura o controle e direção da totalidade do engenho desde sua partida da Terra até sua satelitização na órbita marciana; a segunda parte, a mais importante, é o estágio de aterrissagem, ou *Lander*, encarregado de pousar em Marte e ali proceder a estudos científicos. Cada Lander, firmado sobre quatro pés, é uma espécie de robô científico programado da Terra. Esse robô possui dois cérebros idênticos, dois mini-ordenadores, capazes de controlar todos os sistemas de bordo segundo as instruções contidas em sua memória de uma

capacidade de 18.000 palavras. Os Landers têm em seguida duas câmaras de televisão que podem mostrar o solo em redor do engenho e transmitir panoramas, em preto e branco ou a cores, da paisagem circundante. As câmaras guiam assim o trabalho do "braço" telescópico orientável e da "mão" do robô, pequena pá capaz de apanhar amostras do chão.

★
★ ★

Lançado de Cabo Canaveral por uma fusão Titan-III-E Centauro no dia 20 de agosto de 1975, a Viking I se satelitizou em torno de Marte a 19 de junho de 1976. Como a região escolhida se revelou mais acidentada do que se esperava, ela não pôde pousar no dia 4 de julho como previsto, mas somente no dia 20.

A Viking confirmou a existência de carbono e oxigênio, revelou a presença de argônio (gás pesado que não pode existir a não ser que uma atmosfera

comparável à nossa tenha outrora envolvido Marte), detectou a presença de azoto, um dos grandes ausentes da hipótese clássica.

Esses gases se distribuem da seguinte maneira: 95% de gás carbônico, 2,7% de azoto, 1,6% de argônio, mais traços de oxigênio, de vapor de água, etc.

A modificação da forma e do colorido, já explicada pela Mariner 9, foi confirmada com maior precisão. As nuvens de poeira erguida pelo vento podem nos esconder regiões inteiras durante meses a fio; além do mais, quando um obstáculo como um rochedo se interpõe, a poeira se deposita atrás; resultam as alterações que já mencionamos.

A natureza das calotas polares causou surpresa. Pensava-se até então que eram constituídas de gás carbônico, tendo talvez no centro gelo, tal como o conhecemos na Terra. Para assombro geral, a Viking nos revelou que se trata de água. No entanto, as medidas espectroscópicas tinham permitido analisar

esse gelo como gelo carbônico. Como conciliar esses resultados, aparentemente contraditórios? Na realidade é muito simples. Durante o verão marciano, a temperatura é elevada demais para que o gás carbônico possa se condensar e então a calota polar é tal como vimos, isto é, constituída de gelo de água. Mas quando chega o inverno, a temperatura baixa o suficiente para permitir que o gás carbônico congele; uma delgada película de gelo carbônico irá então recobrir a calota. E aí está nosso problema resolvido!

Logo existe mesmo água em Marte, e em quantidade muito maior do que os mais otimistas pensavam achar. Nas condições de temperatura e pressão atuais, ela não pode se apresentar sob forma líquida; mas existe, como acabamos de ver, sob a forma de gelo nas calotas e de vapor na atmosfera. A Viking nos mostrou também que o próprio solo encerra forte proporção de água congelada, o que lhe dá uma consistência toda especial. Foi ela que valeu para esse subsolo gelado o nome de *perma-*

frost, por analogia com certas regiões polares da Terra.

A Viking tinha por missão, senão principal pelo menos a mais espetacular, determinar se existia vida ou não em Marte. E nesse ponto, continuamos sem saber, pois é impossível afirmar, com base nos resultados atuais, se é esse ou não o caso.

Um dos aparelhos devia medir a quantidade de matéria orgânica contida no solo marciano. Essa matéria orgânica não constitui uma prova de existência da vida, pois, ainda que possa realmente ser de natureza biológica, pode também ser de natureza química. Na Lua, por exemplo, onde se tem certeza de que a vida não existe nem nunca existiu, encontra-se certa quantidade de tal matéria orgânica, aliás mais ou menos a mesma achada nos meteoritos, onde nunca foi encontrado nada de vivo, pelo menos até prova em contrário. Ora, para espanto geral, o solo marciano contém 10 vezes menos matéria orgânica do que o solo lunar. Essa anomalia não recebeu explicação, mas restringe

fortemente as chances de se encontrar uma vida marciana.

Outros aparelhos deviam pôr em evidência essa eventual vida graças a fenômenos como a fotossíntese, a assimilação do alimento ou a respiração. Eles forneceram resultados de tal modo contraditórios que seria bastante temerário tirar qualquer conclusão!

O problema da vida marciana continua, pois, aberto.

Os conhecimentos que temos sobre os dois satélites de Marte, Fobos e Deimos, datam de seu estudo através das sondas espaciais. Esses satélites são minúsculos. Fobos parece uma "batata" de 27 quilômetros de comprimento e Deimos parece outra mas só com 15 quilômetros de comprimento. Para ser mais exato, pode-se representá-las por dois elipsóides, crivados de crateras, cujos eixos têm por dimensão 27,21 e 19 quilômetros para Fobos e 15,12 e 11 quilômetros para Deimos.

Esses dois satélites giram apresentando sempre a mesma face para Marte, como a Lua para a Terra.

Sua origem tem sido discutida quase desde a sua descoberta, há um século. A Viking permitiu solucionar esse problema; manifestamente, trata-se de dois asteróides que foram capturados por Marte.

Júpiter

Júpiter é o gigante do sistema solar. Seu diâmetro e sua massa representam, respectivamente, 11 e 318 vezes os da Terra. Sozinho, ele é 2,5 vezes mais maciço do que o conjunto dos demais planetas do sistema.

Uma simples luneta de amador basta para pôr em evidência os detalhes de sua superfície, que em realidade é a parte superior de sua cobertura de nuvens. Distinguem-se zonas claras e faixas escuras, paralelas ao equador. Certos detalhes aparecem em longitude, como a célebre "mancha vermelha" descoberta por Hooke em 1664. De forma oval, com 40.000 quilômetros de comprimento por 13.000 quilômetros de

largura, nela caberia facilmente a Terra. As diferenças de coloração das formações jupiterianas são devidas a compostos de metano e de amoníaco.

O estudo dos detalhes em longitude mostra que Júpiter não gira como um corpo sólido, mas apresenta uma rotação diferencial. As partes equatoriais efetuam uma rotação em nove horas e 50 minutos, enquanto que as regiões polares giram em nove horas e 55 minutos.

Isto nos prova que Júpiter é fluido, o que é também confirmado pelo pronunciado achatamento desse planeta, igual a 1/15 avos, o que quer dizer que seu diâmetro equatorial, com 142.800 quilômetros, excede o diâmetro polar em 9.500 quilômetros.

Júpiter é, portanto, um corpo essencialmente gasoso, diferente dos que encontramos até aqui. Os quatro primeiros planetas — Mercúrio, Vênus, Terra e Marte — são constituídos por um núcleo sólido, cercado de uma atmosfera mais ou menos espessa, mas sempre pequena ante o tamanho do

planeta. São planetas de alta densidade e pouca massa, que são chamados planetas *telúricos*, por sua semelhança com a Terra. Júpiter pertence a um segundo grupo de planetas, que levam seu nome, os planetas *jovianos*, que são planetas gigantes, de forte massa e fraca densidade. Esse grupo reúne os planetas Júpiter, Saturno, Urano e Netuno que, distanciados do Sol, conservaram sua atmosfera primitiva essencialmente composta de hidrogênio.

O colosso Júpiter é pois constituído de matéria leve, o que é confirmado por sua densidade: 1,3 — apenas um pouco acima da densidade da água.

Júpiter circula em média a 780 milhões de quilômetros do Sol e se desloca em torno dele em 11 anos e 315 dias. É o planeta mais distante já estudado por sondas do espaço, até o presente.

Em 3 de março de 1972, os norte-americanos lançavam a sonda Pioneer 10, que, depois de atravessar o cinturão de asteróides e estudar o meio interplanetário, passava a 131.000 quilô-

metros de Júpiter no dia 4 de dezembro de 1973. Enviou numerosas informações, entre as quais mais de 300 fotografias de Júpiter e de seus satélites. Atualmente, Pioneer 10 se afasta rumo às profundezas do espaço e será o primeiro objeto construído pelo homem a sair do sistema solar. Pioneer 10 possui uma plaqueta destinada a dar a conhecer a origem do engenho a uma eventual raça inteligente que o achasse. Depois de ter examinado essa plaqueta, nós concluímos que esses "extraterrenos" deverão ser particularmente inteligentes!

No dia 6 de abril de 1973 a sonda Pioneer 11 deixava a Terra e se dirigia por sua vez para Júpiter, no qual roçou a 3 de dezembro de 1974, passando a 45.000 quilômetros. Pioneer 11 se dirige atualmente para saturno, que atingirá em setembro de 1979, aumentando assim nossos conhecimentos sobre um outro planeta do sistema solar.

Pioneer 10 e 11 tornaram nossas idéias a respeito de Júpiter consideravelmente mais precisas. Em particular,

Pioneer 10 evidenciou a existência de forte proporção de hélio na atmosfera de Júpiter, o que se suspeitava há muito mas jamais se pudera confirmar a partir de observações terrestres.

Vejamos como é constituído Júpiter, tendo em conta os resultados trazidos por Pioneer 10 e 11. (Fig. 37)

Logo de início, no topo da camada nebulosa que percebemos da Terra, a temperatura é da ordem de - 150°C. Abaixo dessa camada de nuvens cuja espessura ultrapassa 200 quilômetros, acha-se a atmosfera propriamente dita.

A atmosfera se estende por 1.000 quilômetros; compõe-se de 82% de hidrogênio, 17% de hélio e traços de outros elementos. Em sua base a temperatura atinge já 2.000°C.

As condições são tais que o hidrogênio não pode mais se apresentar sob forma gasosa, torna-se líquido. A parte líquida vai prolongar-se até 46.000 quilômetros do centro, a pressão e a temperatura aumentando regularmente. A esse nível, a temperatura alcança 11.000°C e a pressão, 3 milhões de

ATMOSFERA GASOSA

1000 km
2000 °C

HIDROGÊNIO
LÍQUIDO

25 000 km
11 000 °C

HIDROGÊNIO
METÁLICO

NÚCLEO
30 000 °C

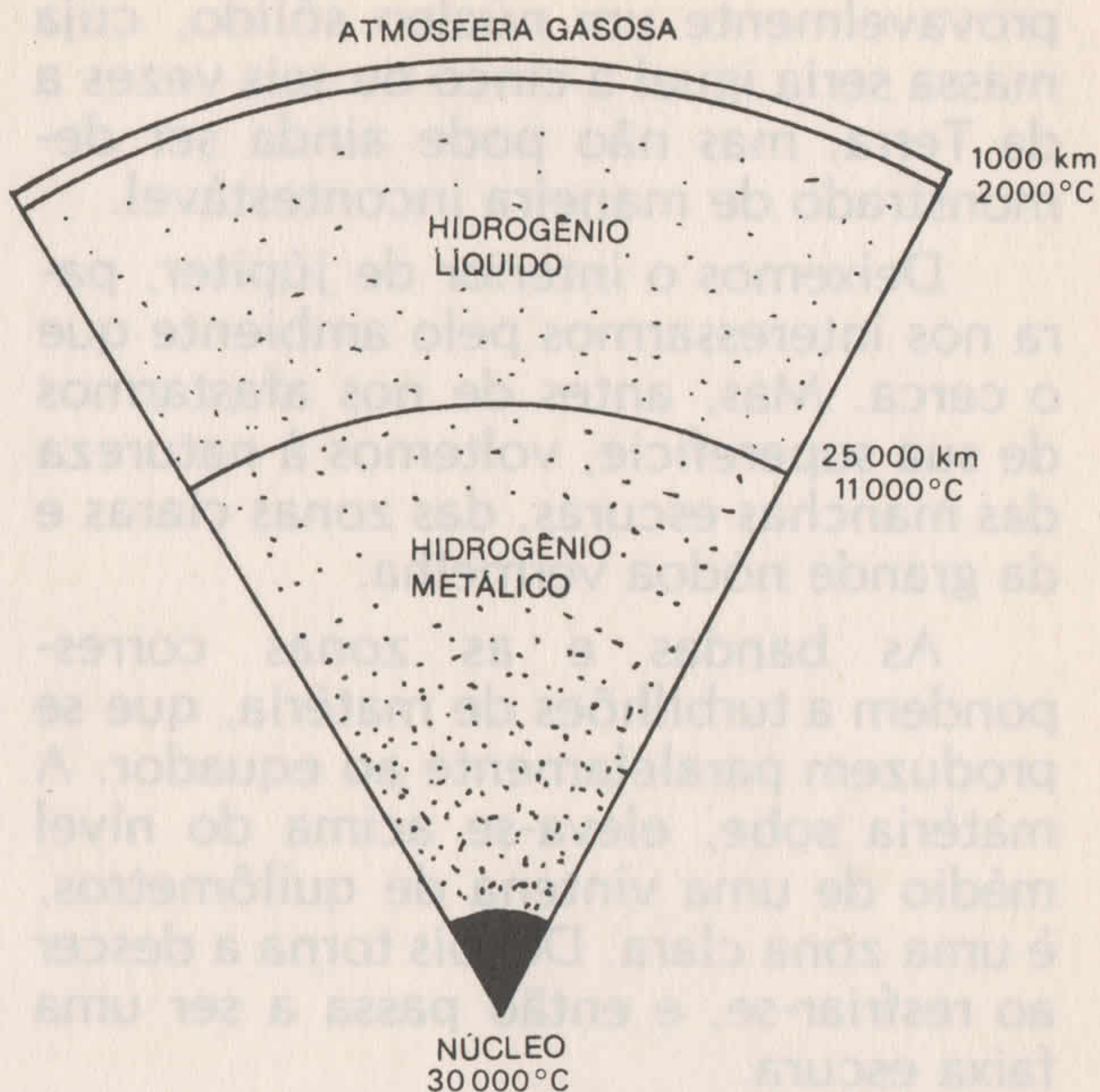



FIG. 37 — ESTRUTURA INTERNA DE JÚPITER.

atmosferas. Então o hidrogênio líquido abandona seu comportamento habitual e torna-se um condutor elétrico; diz-se que estamos em presença do *hidrogênio metálico*.

Bem no centro do planeta, existe

provavelmente um núcleo sólido, cuja massa seria igual a cinco ou seis vezes a da Terra, mas não pode ainda ser demonstrado de maneira incontestável.

Deixemos o interior de Júpiter, para nos interessarmos pelo ambiente que o cerca. Mas, antes de nos afastarmos de sua supereficie, voltemos à natureza das manchas escuras, das zonas claras e da grande nódoa vermelha.

As bandas e as zonas correspondem a turbilhões de matéria, que se produzem paralelamente ao equador. A matéria sobe, eleva-se acima do nível médio de uma vintena de quilômetros, é uma zona clara. Depois torna a descer ao resfriar-se, e então passa a ser uma faixa escura.

A grande mancha vermelha, que tanto tem intrigado os astrônomos há mais de três séculos, parece ser o topo de um imenso e violento furacão que se desenvolve na atmosfera de Júpiter. De fato, as fotografias da Pioneer 11 nos mostram movimentos torvelinhantes no interior da mancha.

Júpiter possui um campo magnético, do mesmo modo que a Terra, mas o seu é enorme. Sua magnetosfera representa um volume igual a um milhão de vezes a magnetosfera terrestre. Ela contém cinturões de radiações 5.000 a 10.000 vezes mais intensas do que os cinturões de Van Allen que circundam a Terra. (Fig. 38)

Treze satélites giram em redor de Júpiter. Os quatro primeiros, muito brilhantes, foram descobertos por Galileu em 1610 que os chamou de *astros de Médicis*. São: *Io, Europa, Ganimedes* e *Callisto*, do nome que lhes deu o astrônomo italiano Simon Marius que os descobriu ao mesmo tempo que Galileu. A descoberta dos outros processou-se com o correr do tempo, até o décimo-terceiro, por C. T. Kowal, em 1974, ou seja, bem recentemente.

Os "astros de Médicis" são muito grandes, medindo os três primeiros um diâmetro superior ao diâmetro lunar, sendo o de Ganimedes de 5.270 quilômetros, o de Callisto 5.000 quilômetros, o de Io 3.640 quilômetros, e o quarto,

Europa, de 3.100 quilômetros, ainda da mesma ordem de magnitude.

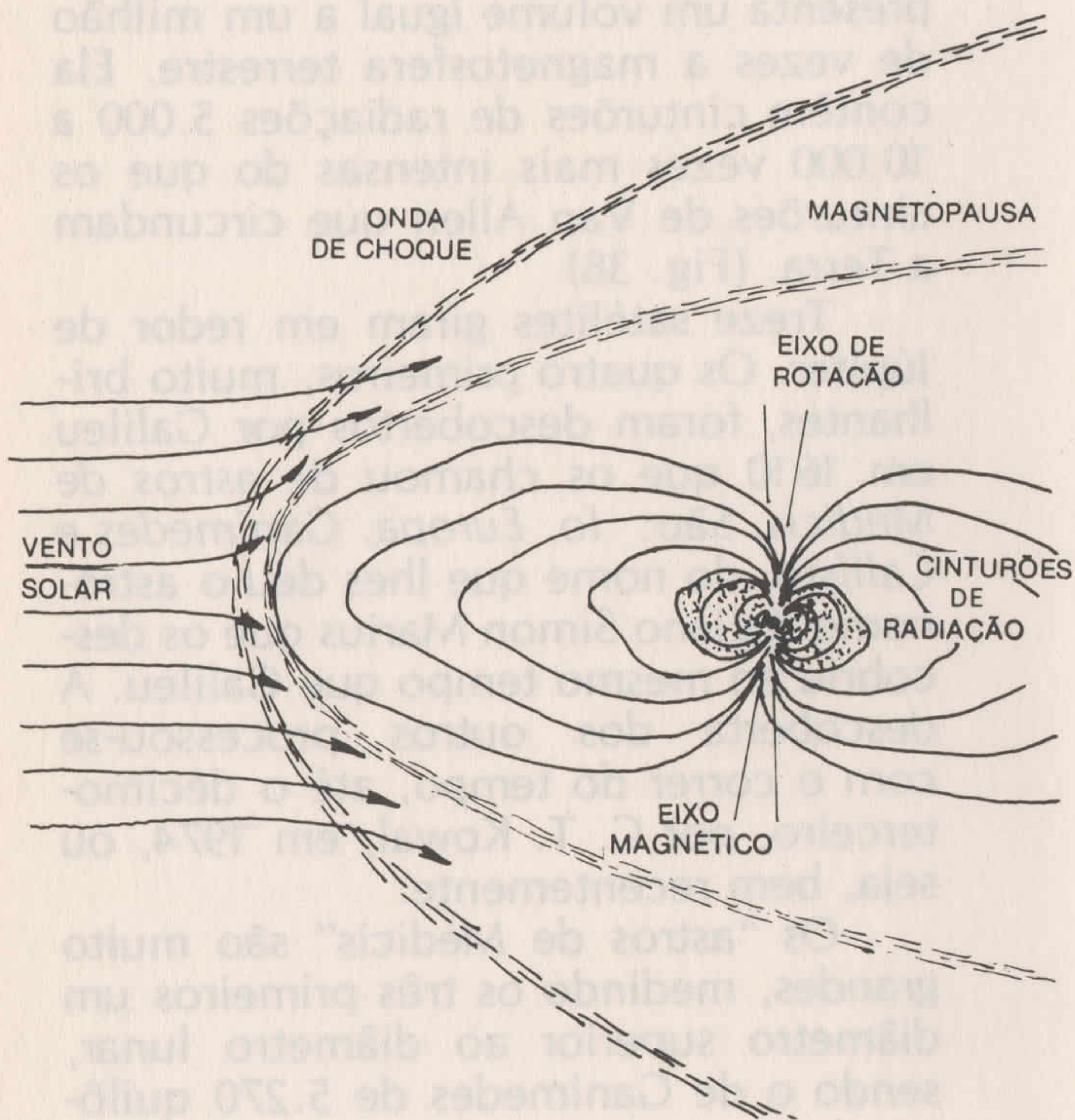



FIG. 38 — A MAGNETOSFERA DE JÚPITER.

Saturno

É o último planeta visível a olho nu.

Menos brilhante do que Júpiter (sua luz é mais branda, mais fria), Saturno é coberto de faixas horizontais verde-cinza que alternam com zonas mais claras. Essas faixas são mais matizadas, menos variáveis que as de Júpiter.

A atmosfera, como o revela o albedo (0,45), é muito densa e semelhante à de Júpiter. Sua temperatura mais baixa, - 180ºC, deixa aparecer em seu espectro traços de metano, mais abundantes que os de amoníaco.

Saturno está duas vezes mais distante do Sol que Júpiter. Sua órbita é percorrida em 29 anos e meio à velocidade de 10 quilômetros por segundo. A rotação se realiza a uma velocidade muito elevada, 10 horas mais ou menos, que aumenta do equador para os pólos onde se observa um sensível achatamento.

A densidade média é muito fraca

na superfície e muito alta no núcleo central onde o hidrogênio e o hélio estão concentrados.

Saturno apresenta uma característica bem conhecida: é cercado de anéis invisíveis a olho nu.

Galileu ao entrevê-los em 1610 acreditava ter descoberto dois satélites de Saturno. Falava em "três estrelas que se tocam e fazem a corte ao velho Saturno sem o deixar um momento".

Huygens foi o primeiro a se dar conta de que as "duas estrelas ao lado" formavam um só anel.

Somente muito mais tarde foi descoberto o terceiro anel exterior, de diâmetro de 275.000 quilômetros e de cor azul-prateada. O anel médio (diâmetro máximo de 234.000 quilômetros) é mais luminoso. Finalmente, o anel interior (diâmetro 150.000 quilômetros) é de tal forma imaterial que foi chamado de "anel de crepe". A espessura desses anéis é de cerca de 15 quilômetros: assim é que podem ser vistos da Terra, de face ou de perfil, segundo a posição de Saturno no céu.

Entre o anel interior e o anel mediano encontra-se a "divisão de Cassini".

Descobriu-se, em fotos tiradas em 1969, um quarto anel, ainda mais impalpável que o precedente. Ele parece chegar até a alta atmosfera de Saturno. (Fig. 39)

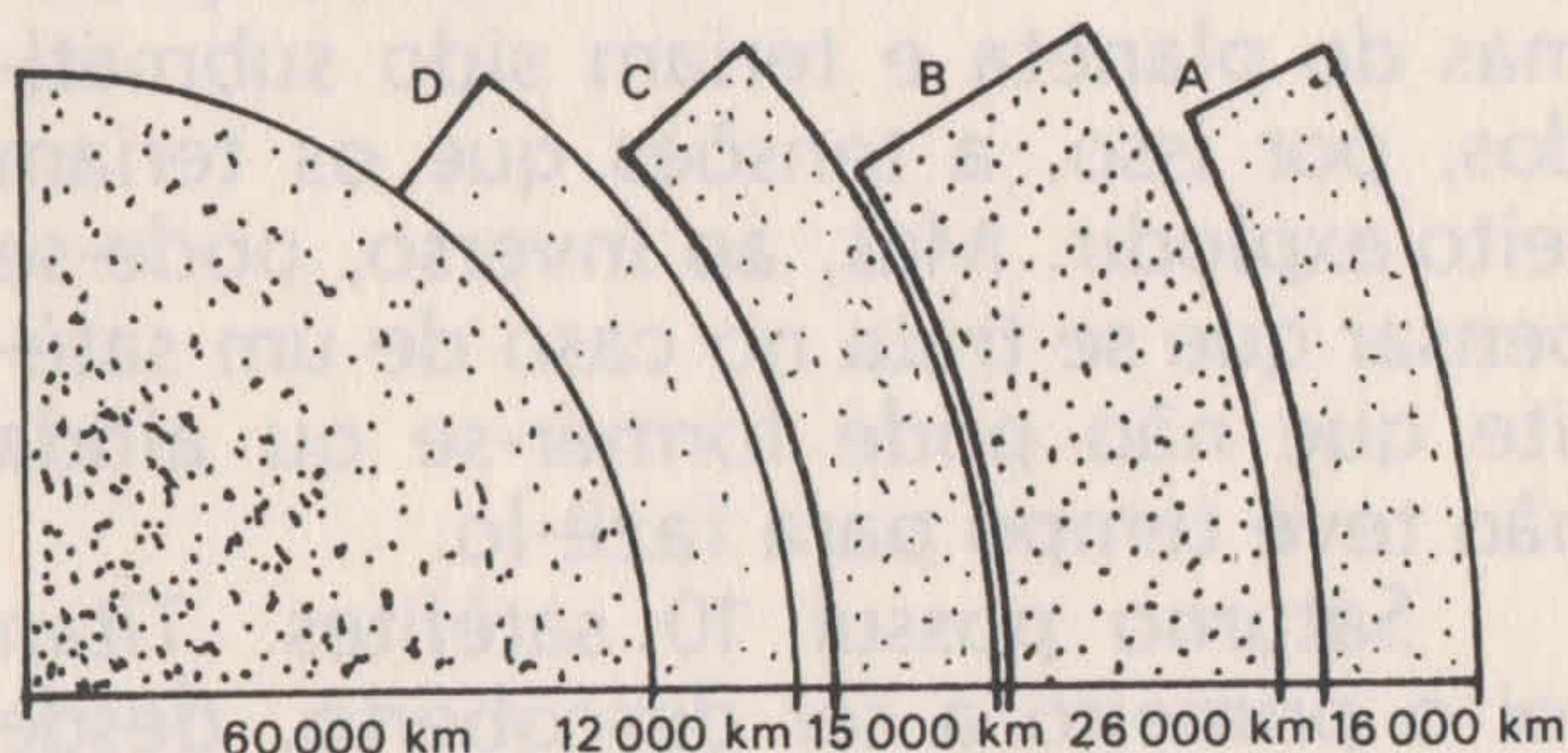
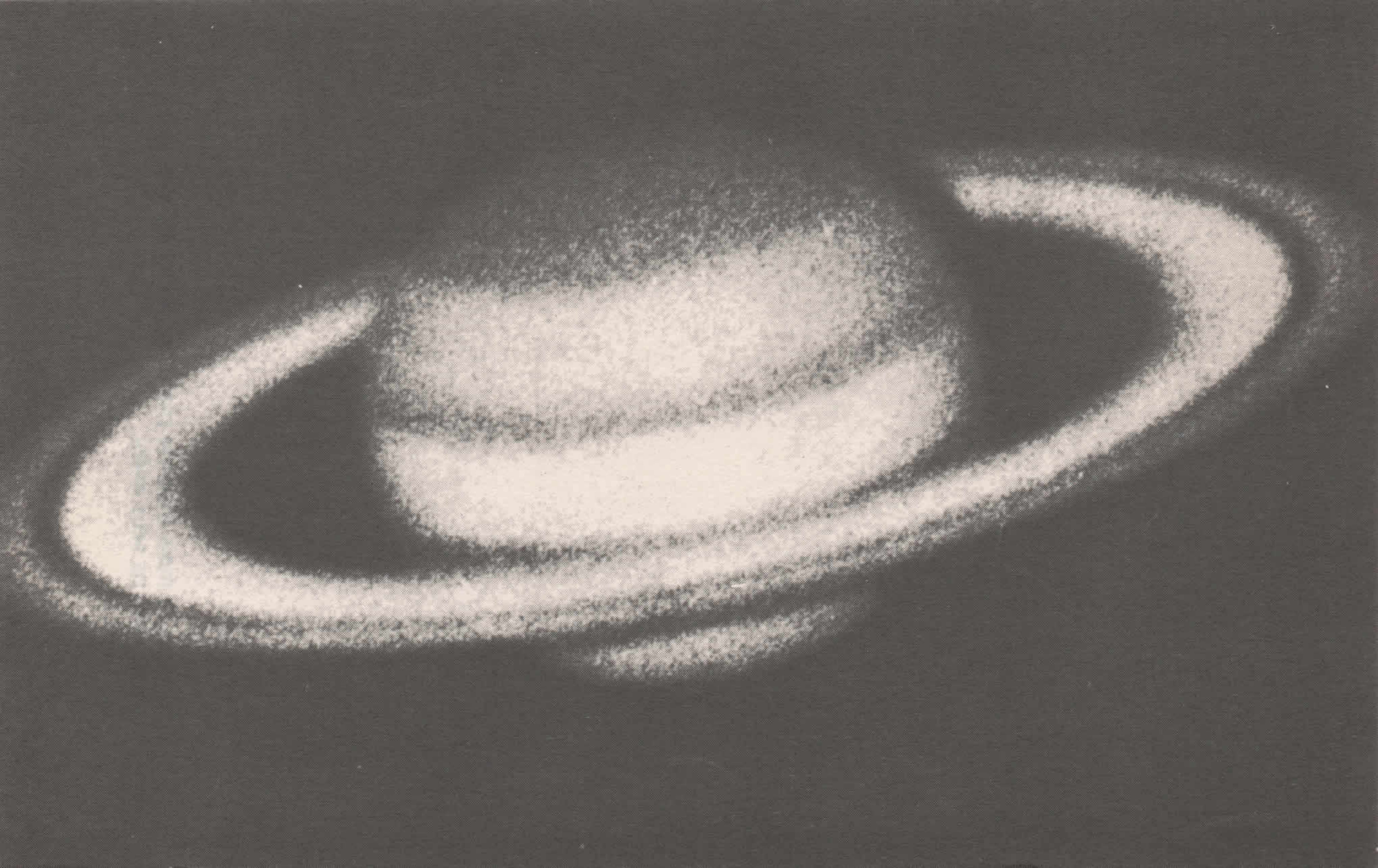



FIG. 39 — OS ANÉIS DE SATURNO.

Os anéis são constituídos por uma multidão de partículas separadas, sendo cada uma um minúsculo satélite de Saturno. Esses satélites têm tamanhos compreendidos entre alguns centímetros e algumas centenas de metros. Sua

natureza não é ainda conhecida com certeza, mas muitos pensam que eles sejam formados de gelo e de fragmentos rochosos recobertos de gelo.

A origem dos anéis é ainda desconhecida. Pode-se imaginar que sejam o resultado da desagregação de um ou vários satélites de Saturno, que se deslocavam em órbitas demasiado próximas do planeta e teriam sido submetidos, por isso, a tensões que os teriam feito explodir. Mas, ao inverso, pode-se pensar que se trata no caso de um satélite que não pôde formar-se ou ainda não teve tempo para fazê-lo.

Saturno possui 10 satélites. *Titan* foi o primeiro a ser descoberto, desde 1655, por Huygens. É um satélite muito grande cujo diâmetro é igual a 5.800 quilômetros. Está cercado de uma espessa atmosfera, na qual se detectou metano, hidrogênio e amoníaco. Os outros satélites têm tamanhos mais modestos, o mais pequeno deles sendo também o mais recentemente descoberto, *Janus*, cujo diâmetro é da ordem de 200 quilômetros. Janus foi descober-

Saturno, o mais distante planeta conhecido dos Antigos, com os seus anéis.

to somente em 1966 por Audouin Dollfus; seu pequeno porte e sua proximidade de Saturno o haviam até essa data ocultado aos observadores.

Se Janus gira em volta de Saturno em somente três quartos de um dia, a 160.000 quilômetros de distância, *Febe*, o satélite mais distante, gira em 550 dias a uma distância média de 12,4 milhões de quilômetros e no sentido retrógrado.

Urano

Urano foi descoberto por puro acaso, em 1781, por W. Herschel quando observava a constelação de Gêmeos.

Essa estrela de sexta grandeza que aparecia como um disco, algo maior que os outros, podia ser um cometa. Ao fim de um ano, Herschel teve a certeza que era um planeta.

Seu diâmetro é de 51.800 quilômetros aproximadamente e sua massa é 15 vezes a da Terra. Sua densidade é ligeiramente inferior à de Júpiter.

A distância entre ele e o Sol é o dobro da de Saturno e leva 84 anos para cumprir uma revolução completa.

Sua órbita, pouco inclinada sobre o plano da eclíptica — 0,8° —, é muito pouco excêntrica. Em compensação, o eixo de rotação tem uma inclinação de quase 98° sobre o plano da órbita. É por isso que o Sol, durante seus 84 anos de revolução, se encontra no zênite, sucessivamente, em todas as regiões do planeta.

No telecópio, Urano aparece como um disco verde-azulado. O espectro apresenta mais ou menos as mesmas características de Júpiter e Saturno: Urano está envolto numa atmosfera densa em que o metano e o amoníaco existem nas mesmas proporções que em Saturno.

★
★ ★

Urano tem cinco satélites: *Titania, Oberon, Ariel, Umbriel* e *Miranda*. Este último, descoberto em 1948, é o mais

próximo do planeta. Eles são muito difíceis de observar: suas órbitas são quase circulares no plano da eclíptica.

Estavam nisso nossos conhecimentos sobre Urano, quando a 10 de março de 1977, uma bomba estourou nos domínios da astronomia: três pesquisadores norte-americanos, J. Elliot, E. Dunham e D. Mink, que trabalhavam a bordo de um avião transformado em laboratório, acabavam de descobrir a existência de anéis ao redor do sétimo planeta.

Os três astrônomos tinham a incumbência de observar a ocultação de uma estrela por Urano, ou seja, a passagem do planeta diante da estrela. Dessa ocultação desejavam deduzir dados mais precisos sobre o diâmetro de Urano, bem como sobre a composição e temperatura de sua atmosfera, estudando as variações de luminosidade da estrela.

Quarenta minutos antes da ocultação, a estrela desapareceu e o fenômeno se repetiu por mais quatro vezes antes de sua passagem por trás do pla-

neta. Idêntico fenômeno ocorreu depois do reaparecimento da estrela.

A partir desses resultados, pôde-se calcular que cinco anéis giravam em torno de Urano, formando um cinturão de 7.000 quilômetros de largura a cerca de 19.000 quilômetros de sua superfície. Os quatro anéis mais próximos do planeta teriam uma largura de uma dezena de quilômetros e o mais distante, uma centena de quilômetros.

Esses anéis são muito pequenos, é claro, comparados aos de Saturno; são, contudo, muito importantes, pois até então se pensava que o fenômeno era exclusivo de Saturno e só se procurava tirar conclusões para esse planeta. A descoberta de anéis em torno de Urano prova que estamos diante de um fenômeno muito mais geral e nos leva a considerá-los não mais na escala planetária e sim na do sistema solar.

Netuno

Netuno foi descoberto em 1846 graças a cálculos sobre as perturbações que afetavam a órbita de Urano. De fato, as posições desse planeta previstas para os cálculos não coincidiam com as que eram observadas: Urano, em certos momentos, sofria um atraso de 20 segundos, ou, ao contrário, estava adiantado.

Adams e Le Verrier concluíram daí que os desvios de Urano eram ocasionados por outro planeta. Netuno estava descoberto e os atrasos ou adiantamentos de Urano finalmente explicados! De fato, Urano tem uma órbita mais interna e mais rápida do que a de Netuno: entretanto, este exerce forte atração sobre ele. Quando Urano ultrapassa Netuno, este o atrai para si e em conseqüência o atrasa. Inversamente, Urano acelera o movimento, para "alcançar" Saturno, quando, em atraso, se aproxima deste.

Netuno se assemelha muito a Urano. Não é visível a olho nu e aparece

como um disco verde. A temperatura nele é da ordem de - 220°C.

Netuno gira sobre si mesmo em 16 horas e se locomove em perto de 165 anos em volta do Sol, numa órbita muito pouco inclinada sobre a eclíptica.

Netuno possui dois satélites: *Tritão* e *Nereida*.

Tritão, com seus 6.000 quilômetros de diâmetro, é o maior satélite do sistema solar. Gira em torno de Saturno em perto de seis dias, numa órbita circular no sentido retrógrado.

Nereida, muito menor, não alcança a décima parte do diâmetro de Tritão. Sua órbita é a mais alongada entre as dos satélites. Ao passar mais perto de Netuno chega a 1.395.000 quilômetros, para se distanciar até 9.725.000 quilômetros. Sua revolução se realiza no sentido direto.

Plutão

A descoberta de Plutão foi *parecida* com a de Netuno. Analisando per-

turbações das trajetórias de Urano e de Netuno, Pickering e Lowell concluíram que devia haver um planeta para além de Netuno.

As pesquisas para descobrir esse novo planeta duraram mais de uma década e somente em 1930 Clyde W. Tombaugh divisou um fraco ponto luminoso perto da estrela δ dos Gêmeos. Depois disso, descobriram a imagem de Plutão em outros clichês antigos, onde ele tinha passado despercebido.

Embora tenha sido descoberto a mais ou menos cinco graus do lugar determinado pelos cálculos, Plutão suscita ainda numerosos problemas. De fato, ele não corresponde absolutamente ao que estava previsto; sua massa é demasiado pequena para produzir as perturbações observadas em Urano e Netuno.

Na realidade, sabe-se muito pouca coisa sobre esse planeta que, nos mais potentes telescópios, não aparece senão como um simples ponto luminoso.

Plutão se desloca em torno do Sol numa órbita que é a mais excêntrica

entre as dos planetas do sistema solar. Essa órbita o faz passar entre 4,4 bilhões de quilômetros e 7,4 bilhões de quilômetros do Sol, o que vale dizer que acontece ele passar mais perto do Sol do que Netuno. Por sorte, sua trajetória é muito inclinada (17,2°) sobre a eclíptica e não há risco de se produzir uma colisão entre os dois planetas.

Plutão leva 2,5 séculos para realizar uma revolução em torno do Sol. Portanto, desde sua descoberta, somente o acompanhamos por um arco de trajetória bastante curto.

Sua massa e seu diâmetro foram reavaliados diversas vezes no passado. Sua massa é atualmente considerada como sendo da ordem do décimo da massa terrestre, mas é preciso tomar esse número apenas como uma indicação. Seu diâmetro até bem pouco era avaliado como sendo igual a 6.000 quilômetros. Medidas tomadas ao telescópio de quatro metros do observatório de Kitt Peak, em março de 1976, vieram fornecer novo valor, de maneira indireta. As medidas mostraram que Plutão

é coberto de uma camada de metano gelado, o qual é um bom refletor, portanto o valor antes atribuído a seu albedo era baixo demais, o que acarretava a atribuição de um valor exagerado ao diâmetro. A partir dos novos dados, calculou-se um diâmetro de 3.000 quilômetros mais ou menos. Em conseqüência, Plutão é o menor planeta do sistema solar.

Os cometas: da lenda ao estudo científico

Os cometas sempre foram objeto das piores superstições. Eram acusados de todos os infortúnios possíveis e imagináveis: epidemias, guerras etc.

Cronistas judeus falam de uma imensa espada chamejante que apareceu em Jerusalém em 69 a.C., pouco antes de a cidade ser tomada pelos Romanos.

Em 1456, o Papa Calisto tinha acrescentado a suas litanias esta prece: "Senhor, salva-nos do demônio, dos

	Distância média (milhões de km)	Diâmetro equatorial (km)	Massa (Terra= 1)	Período de revolução	Período de rotação (R= retrógrado)	Número de satélites conhecidos
Mercúrio	58	4.880		88d	59d	0
Vênus	108	12.100	0,06	225d	243dR	0
Terra	150	12.750	0,8	365,25d	23h56min04s	1
Marte	228	6.790	0,1	687d	24h37min23s	2
Júpiter	780	142.800	318	11,85 anos	9h50min	13
Saturno	1.430	120.000	95	29,45 anos	10h14min	10
Urano	2.850	51.800	15	84 anos	11hR	5
Netuno	4.500	49.500	17	165 anos	16h	2
Plutão	5.900	3.000(?)	0,1(?)	248 anos	6d9h	0

Características dos Planetas

Turcos ... e do cometa!"

O cometa de 1811, estudado por Gauss, ficou célebre por suas dimensões e pelas superstições a que deu origem.

★
★ ★

Os cometas foram assinalados no céu bem antes de nossa era. Mas sua natureza permaneceu por muito tempo incompreendida. Aristóteles acreditava que se tratasse de exalações de gás provenientes do interior da Terra. Não foi senão no século XVI, com Tycho Brahe, que se começou a considerá-los como corpos celestes. De estudos realizados sobre o cometa de 1577, Tycho Brahe concluiu que ele devia estar a uma distância superior à da Lua. Mais tarde, deu-se atenção ao movimento dos cometas: acreditaram a princípio ser ele circular, depois retilíneo, finalmente parabólico.

No fim do século XVII, Halley descobriu que o cometa de 1682 e os

observados em 1456 e 1607 não eram senão um e o mesmo cometa que reaparecia a cada 76 anos. Assim o cometa de Halley visto em 240, 163 e 87 a.C. deverá aparecer também em 1986.

Antes da invenção do óculo-de-alcance, enumeravam-se cerca de 400 cometas. Atualmente, graças ao telesccópio, descobre-se quase uma dezena por ano. Kepler tinha razão em sustentar que os cometas são "tão numerosos como os peixes do oceano". Mas geralmente são invisíveis, pois só se tornam luminosos nas vizinhanças do Sol. O brilhante cometa observado em 1843 era visível mesmo em pleno dia e sua "cauda" atingia 300 milhões de quilômetros.

As órbitas dos cometas podem ser *elípticas, parabólicas* ou *hiperbólicas*.

Cada vez que se pôde observar um cometa a uma distância suficientemente grande, verificou-se que ele tinha uma órbita elíptica muito excêntrica cujo semi-eixo maior era da ordem de 50.000 UA (unidade astronômica). Isto nos indica que se os cometas provêm

de espaços extremamente longínquos, não obstante pertencem ao sistema solar.

As órbitas parabólicas e hiperbólicas resultam de perturbações planetárias. Quando um cometa passa ao lado de um grande planeta, Júpiter por exemplo, sua trajetória se acha infletida e sua órbita pode tornar-se uma parábola ou uma hipérbole. Nesse caso o cometa, depois de ter passado em volta do Sol, se afasta e sai do sistema solar, jamais o veremos de novo.

Pode suceder, ao contrário, que a perturbação coloque o cometa numa trajetória elíptica muito curta e ele se torne então um desses cometas periódicos que revemos a intervalos regulares; como o cometa de Halley.

Para fixar as idéias, vejamos como se distribuem os períodos de cerca de 600 cometas cujas órbitas são bem conhecidas:

— 11% têm trajetórias hiperbólicas;
— 51% têm trajetórias parabólicas;

— 21% têm períodos de mais de 262 anos;

— 4% têm períodos compreendidos entre 27 e 165 anos;

— 13% têm períodos inferiores a 18 anos.

Os cometas não se deslocam, como os planetas, em planos vizinhos da eclíptica, mas podem ter com ela algumas inclinações.

Antes de falar dos caracteres físicos e químicos desses objetos, interessemonos por sua denominação, para não nos espantarmos ao saber que um cometa que era designado por um número agora o é por outro.

Inicialmente, o cometa recebe o nome daquele ou daqueles que o descobriram. Em seguida, é designado provisoriamente pelo ano de sua descoberta, seguido da letra a, b, c, etc., conforme tenha sido respectivamente o primeiro do ano, o segundo, o terceiro, etc. Finalmente, após determinação de sua órbita, ele é definitivamente designado pelo ano de sua passagem no periélio, seguido de um algarismo romano

que indica a ordem de passagem.

Assim, por exemplo, o belíssimo cometa Bennett leva esse nome porque foi descoberto por J. C. Bennett em Pretória, a 28 de dezembro de 1969. Era o nono cometa descoberto nesse ano, por isso foi chamado: 1969 i. Não passou pelo periélio senão em 1970 e outro cometa nesse mesmo ano já passara pelo seu. Portanto sua designação oficial é desde então: 1970 II.

Os cometas são corpos muito diferentes dos que encontramos até agora no sistema solar. (Fig. 40) Compõem-se principalmente, quase que unicamente poderia dizer-se, de um *núcleo*. Esse núcleo é sempre minúsculo, seu diâmetro é da ordem de alguns quilômetros, dezenas em casos excepcionais. Logo, é um corpo muito pequeno e, nesse estado, é absolutamente invisível.

O núcleo é envolto numa *cabeleira* que com ele compõe a *cabeça*. A cabeleira se estende em média sobre um diâmetro de 20.000 a 120.000 quilômetros ao redor do núcleo.

Finalmente a cabeça é prolongada

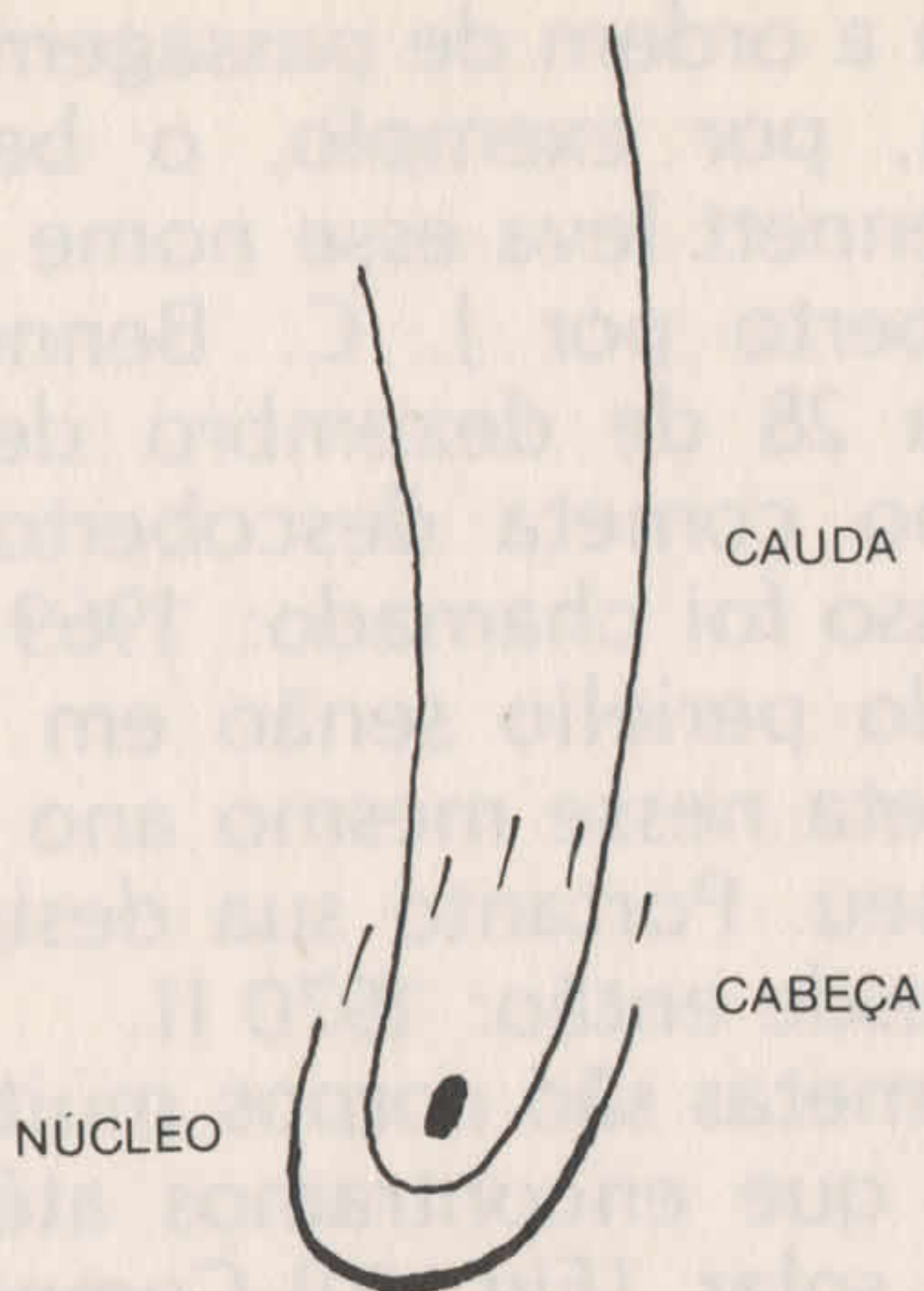



FIG. 40 — COMPOSIÇÃO DE UM COMETA.

por uma espécie de *cauda* que pode se estender por dezenas de milhões de quilômetros, ou mesmo centenas.

Enumeremos agora a série de fenômenos que acompanha o aparecimento de um cometa.

Esse pequenino astro, depois de longa viagem, chega às regiões centrais do sistema solar. Até então, não é mais do que um núcleo e, como dissemos há

pouco, seu pequeno tamanho o torna invisível. Pensamos atualmente que o núcleo é constituído de "neve suja", o que significa que ele seria formado de um aglomerado de poeira e de cristais de gelo, de amoníaco, de gás carbônico e de metano.

Quando ele não está mais do que a uma distância de algumas unidades astronômicas do Sol, este o aquece, ocorre um fenômeno de gaseificação e o núcleo é envolvido pela cabeleira.

À medida que o cometa se aproxima do Sol, as partículas que ele emite a todo instante repelem o gás que circunda o cometa e a cauda aparece. Essa cauda está sempre na direção oposta à do Sol, o que resulta do mecanismo de sua formação. Constatou-se, nestes últimos anos, com base em medidas tomadas acima da atmosfera terrestre, que os cometas são cercados por imensas nuvens de hidrogênio. (Fig. 41)

Logo os cometas são corpos iluminados pelo Sol que repele suas partículas. Cada retorno de um cometa periódico é um passo para a sua desinte-

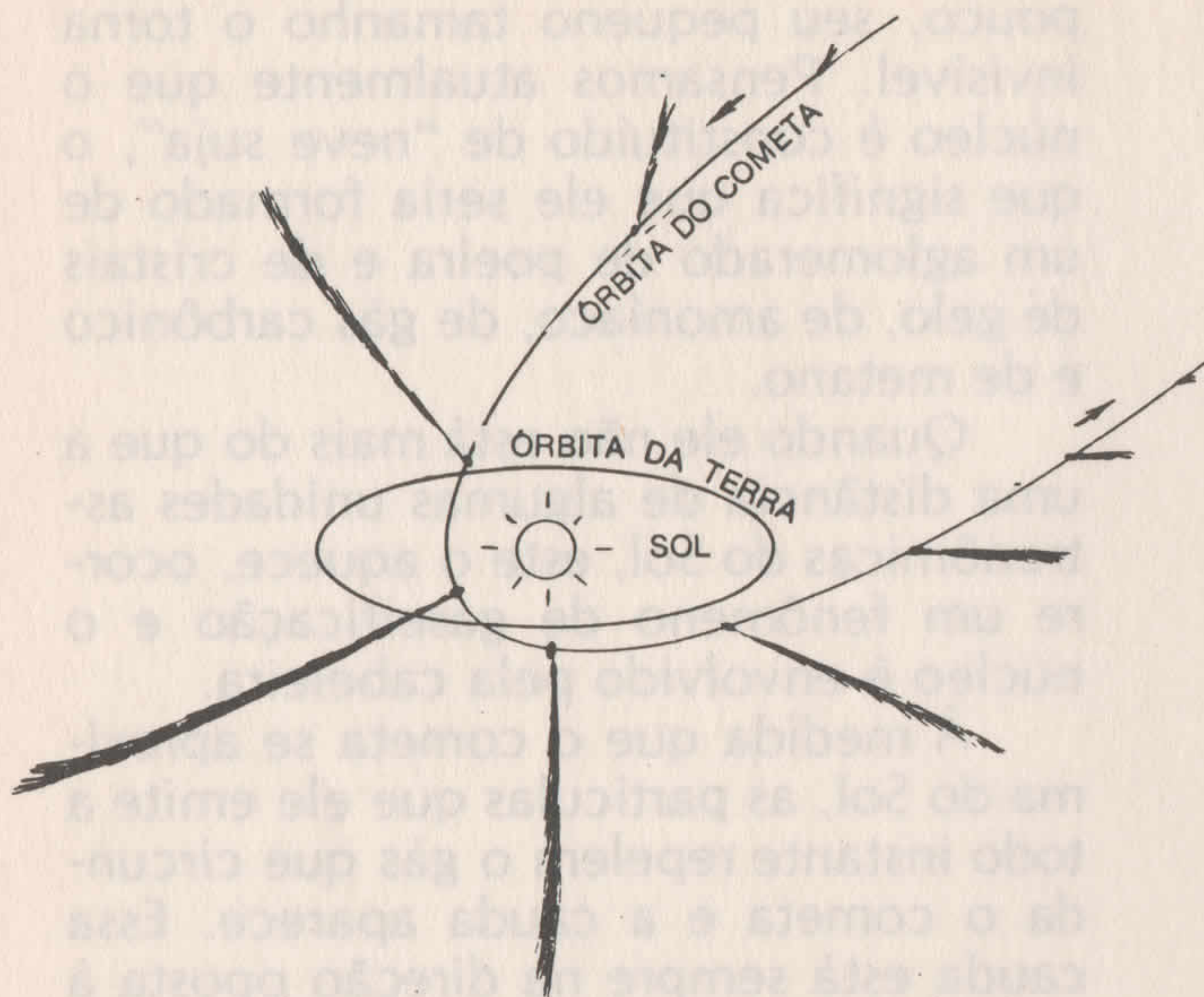



FIG. 41 — TRAJETÓRIA E ASPECTO DE UM COMETA PERTO DO PERIÉLIO.

gração e eles se tornam cada vez menos brilhantes, como o cometa de Halley por exemplo.

Acontece mesmo o núcleo fragmentar-se e o cometa acabar desaparecendo. Tal é o caso do cometa Biela (1806 I) que se partiu em dois em 1846. Vejamos a descrição que fez Valz: "Nos

dias 18 e 20 de janeiro, o cometa não apresentou nada de especial. Somente a condensação luminosa central pareceu-me mais intensa do que nas vezes anteriores. O tempo encoberto não me permitiu rever o cometa antes de 27. Fiquei surpreso ao encontrar então duas nebulosidades a 2′ de intervalo, em vez de somente uma nebolusidade... Ontem, 29, apesar das nuvens, observei de novo a cabeça dupla; a cabeça secundária é bem mais fraca que a outra."

O cometa Biela tinha um período de 6,6 anos. É desnecessário dizer que todos os observadores o aguardavam em sua volta. Os dois cometas reapareceram efetivamente, mas estavam já a mais de 2,5 milhões de quilômetros, um do outro. Depois sumiram e não compareceram ao encontro marcado subseqüente; mas, a 27 de novembro de 1872, assistiu-se a uma incrível chuva de estrelas cadentes, proveniente da desagregação do cometa ao longo de toda sua órbita.

Os cometas são os objetos mais distantes do sistema solar; nascidos ao

mesmo tempo que ele, encontravam-se sobre uma esfera ou anel de 100.000 UA de diâmetro, centrado sobre o Sol. A nuvem de cometas compreenderia 100 bilhões de membros e sua massa total não excederia a décima parte da massa da Terra.

Estrelas cadentes, bólides e meteoritos

As *estrelas cadentes* são minúsculos *meteoritos,* ou seja, pequenos fragmentos sólidos que não excedem de um grama, cuja passagem pela atmosfera é assinalada por um fenômeno luminoso muito fugidio.

Os Antigos haviam assinalado a repetição dessas manifestações espetaculares; mas sua origem permaneceu por muito tempo obscura até que Olbers, em 1834, verificou que os "chuviscos" de 1799, 1833 e 1866 apresentavam um intervalo de cerca de 33,5 anos. Foram chamados de *Leônidas*, pois pareciam provir de um ponto da constelação de

Leão.

Observou-se também que seus movimentos seguiam direções paralelas e que sua origem remontava ao ano 902, época na qual o fenômeno havia alcançado seu máximo, a 12 de outubro.

A partir de 1899, esses brilhantes chuviscos diminuíram, assim como os das *Perseidas* também chamadas "lágrimas de São Lourenço".

Essa atenuação é devida a perturbações planetárias sofridas pela matéria que constitui o enxame, que acaba por se dispersar.

Os estudos sobre a natureza desses fenômenos confirmaram que se trata realmente de chuva de meteoritos resultantes de restos de cometas desagregados, ou em vias de o serem, salvo no caso de certos meteoritos *esporádicos,* isto é, meteoritos isolados.

O estudo dos diversos enxames permitiu determinar a origem de uma parte considerável deles. Assim, entre mais de uma vintena de enxames de meteoritos conhecidos atualmente, 11 estão associados a cometas.

Constata-se, o que resulta de um efeito de perspectiva, que as trajetórias de cada enxame parecem divergir a partir de uma mesma região do céu chamada o *radiante* do enxame. A matéria que compõe o enxame tende a se dispersar numa espécie de anel contínuo, ao longo da órbita original do cometa, o que explica os reaparecimentos desses meteoritos todos os anos, na época em que a órbita da Terra encontra a do cometa. Isso explica também por que as "chuvas" não são idênticas todos os anos, já que a matéria não se reparte de maneira uniforme ao longo de todo o anel.

Os *bólides* representam um fenômeno análogo, porém mais espetacular. A única diferença provém de sua massa que pode ser enorme. Atravessando as camadas mais densas da atmosfera, eles "pegam fogo" e aparecem como globos de fogo. Alguns são mais luminosos do que a Lua. Na maioria das vezes, explodem no ar, ouvem-se detonações e um ruído de trovão. Chegando ao solo, estão já extintos e frios, pois o calor não

Um cometa, astro majestoso que nos visita dos confins do sistema solar.

tem tempo de penetrar no interior do bólido, só as partes externas é que são aquecidas e se dissipam na atmosfera.

Também os meteoritos têm sido objeto de culto. A famosa "pedra negra" dos Maometanos, a "pedra de Diana" em Éfeso, a do "Deus Sol" caída na Síria contam-se entre as mais célebres. Gregos e Romanos pensavam que os Deuses se divertiam lançando tais objetos!

Os maiores meteoritos cavaram na Terra enormes crateras, notadamente no Arizona, onde a Meteor Crater tem um diâmetro de 1.250 metros. Os fragmentos encontrados continham ferro, níquel e platina. Pode-se supor que o meteorito que ali caiu pesava mais de dois milhões de toneladas. A queda teria ocorrido há cerca de 25.000 anos.

Os *micrometeoritos* são partículas microscópicas que caem sobre a Terra sob a forma de poeiras meteóricas ou de produtos de fusão dos meteoritos. Eles mal se distinguem das poeiras terrestres. São encontrados não somente no solo, mas igualmente nos sedimentos, no fundo dos oceanos.

Num ano, a massa de depósito acumulada na Terra se eleva a cerca de cinco milhões de toneladas.

No espaço, parece que os micrometeoritos participam do fenômeno conhecido pelo nome de "luz zodiacal".

De ponto de vista meteorológico, seu papel é importante, pois constituem núcleos de condensação do vapor de água da atmosfera e são assim fatores de pluviosidade e de conductibilidade térmica do ar.

Os meteoritos se dividem em três grandes classes conforme as proporções de metais e silicatos que encerrem:

— as *pedras* ricas em silicatos;
— os *ferros* ricos em metais;
— as litossideritas contendo partes aproximadamente iguais de metal e de silicato.

A tabela seguinte (segundo K. Keil) dá as porcentagens em freqüência de quedas e em peso das diferentes classes.

Classe	Freqüência	Peso
Pedras	92,7	33,7
Ferros	5,6	64,7
Litossideritas	1,7	1,6

O Sol, Deus feito estrela

Imaginavam os Gregos que Hélios, o Sol, se levantava a leste no oceano, percorria a abóbada celeste em seu carro puxado por cavalos alados e mergulhava ao entardecer no oceano, no oeste.

De resto, é o caminho aparente por ele percorrido todos os dias. Seu lugar é no centro do sistema solar e os planetas que sofrem sua atração giram ao seu redor. Sua massa por si só representa 99% de todo o Sistema.

O Sol é a estrela mais próxima de nós. No telescópio, aparece como um disco brilhante de bordos ligeiramente escuros. Percebem-se também distintamente as manchas descobertas por Ga-

lileu, J. Fabricius e o Padre C. Scheiner em 1611, que destruíram de vez a idéia de que os astros eram esféricos e de uma estrutura perfeita. Recorreu-se então à astrologia: as manchas anunciavam uma diminuição de brilho do Sol e, em conseqüência, uma catástrofe geral.

A descoberta ulterior da periodicidade das manchas provou ao contrário que elas eram o índice de uma renovação da atividade solar.

Geralmente, elas se agrupam aos pares e são cercadas de manchas mais pequenas; a zona central muito escura, a *sombra,* é envolvida por uma parte mais clara, a *penumbra*. (Fig. 42)

Essas manchas se desenvolvem em períodos de mais ou menos uma semana, depois se reduzem pouco a pouco e acabam desaparecendo. As mais importantes, cujo tamanho freqüentemente ultrapassa o da Terra, podem persistir vários meses. Durante seu desenvolvimento, elas se deslocam sobre o Sol, passando de um bordo a outro, testemunhas da rotação do astro sobre si mesmo (cerca de 27 dias). Seu trajeto é

PENUMBRA

SOMBRA

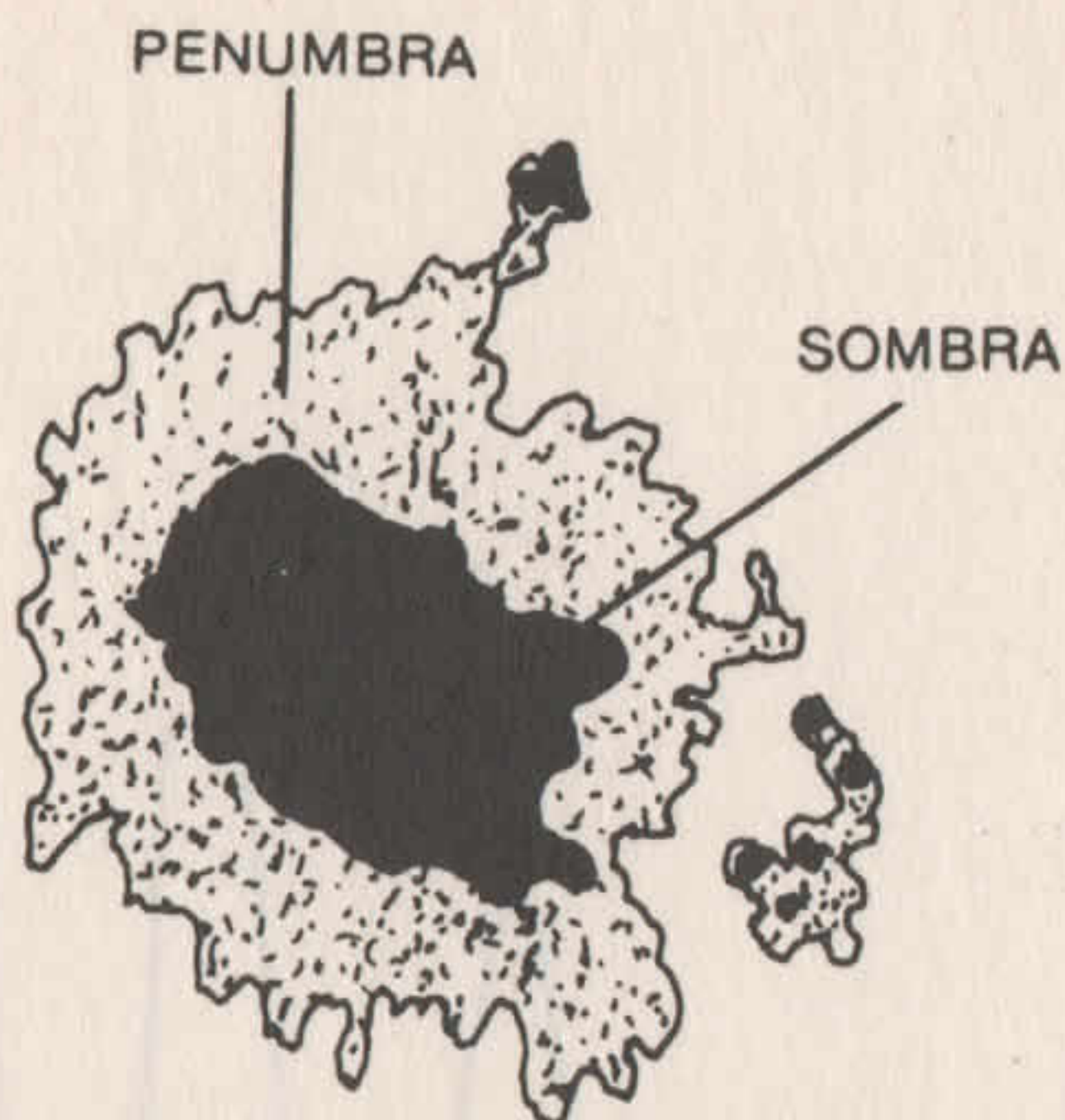



FIG. 42 — MANCHA SOLAR.

retilíneo; descrevem uma elipse aparente cujo eixo é inclinado 7° em relação à eclíptica. Ao se aproximar do bordo, elas parecem achatar-se cada vez mais.

No século XIX, Schwabe descobria o ciclo das manchas solares: sua extensão varia segundo um período de 11 anos. Há épocas de máximo em que o Sol fica constelado de manchas e épocas de mínimo em que nenhuma aparece durante dias, semanas ou meses, até a chegada de um novo ciclo a partir do qual a sua freqüência torna a aumentar para um novo máximo. (Fig. 43)

Essas manchas são consideradas

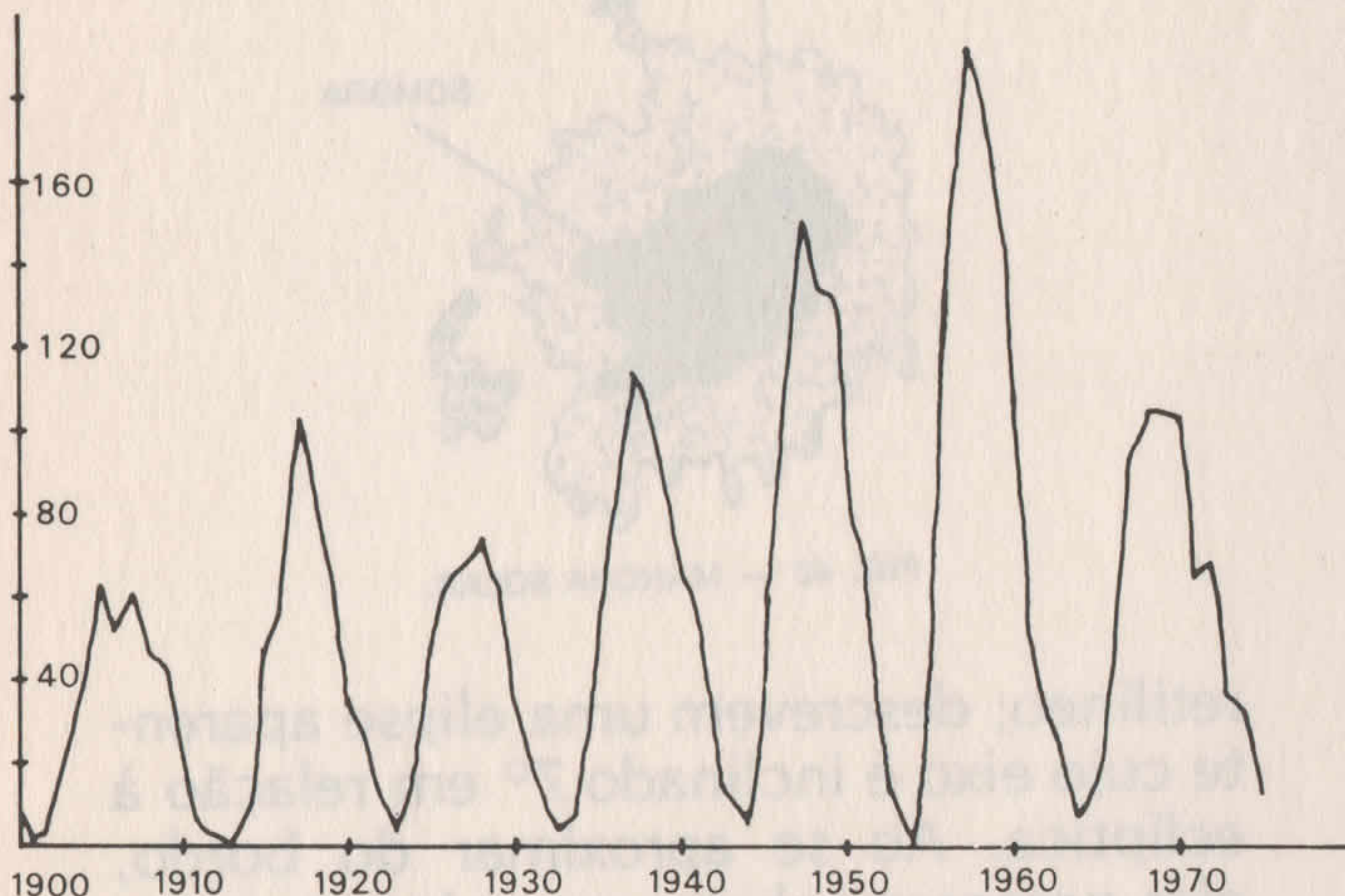



FIG. 43 — A CURVA DE ATIVIDADE SOLAR DE 1900 A NOSSOS DIAS.
O NÚMERO NA ORDENADA, CHAMADO NÚMERO DE WOLF, ESTÁ LIGADO AO NÚMERO DE MANCHAS E DE GRUPOS DE MANCHAS.

como centros de zonas de perturbações no interior da *fotosfera,* a parte mais interna da atmosfera solar. Na proximidade surgem amiúde regiões brilhantes, de estrutura fibrosa: são as *fáculas,* massas de gás de temperatura elevada que podem estender-se a mais de deze-

nas de milhares de quilômetros.

Além das manchas, facilmente distinguidas nos períodos de atividade, percebe-se na superfície do Sol uma fina granulação; a fotosfera, em lugar de ser uniforme, parece feita de grãos brilhantes espalhados sobre um fundo escuro. Sua vida é muito breve, somente alguns minutos.

Toda a massa solar está em estado gasoso. À medida que nos aprofundamos no seu interior, a atmosfera tornase cada vez menos transparente e isto muito rapidamente. Esse brutal aumento da opacidade explica que o Sol apresente uma borda absolutamente nítida. As camadas mais opacas e mais internas constituem a *fotosfera*, com espessura de algumas centenas de quilômetros; as camadas mais externas e transparentes formam a *coroa solar*. A parte mais baixa é a *cromosfera*, composta sobretudo de gases leves, hidrogênio e hélio. Acima dela se elevam as chamas rubras das *protuberâncias*, enormes jatos de gás solar que atingem alturas inimagináveis. (Fig. 44)

GRANDES JATOS
CORONÁRIOS

COROA EXTERNA

COROA INTERNA

2 A 3 MILHÕES
DE GRAUS

CROMOSFERA INTERNA

FOTOSFERA

10 000
km

4500 à
20 000°C
5800°C

ZONA CONVECTIVA

300 km

ZONA
RADIOATIVA

700 000 km

NÚCLEO
CONVECTIVO

15 MILHÕES
DE GRAUS

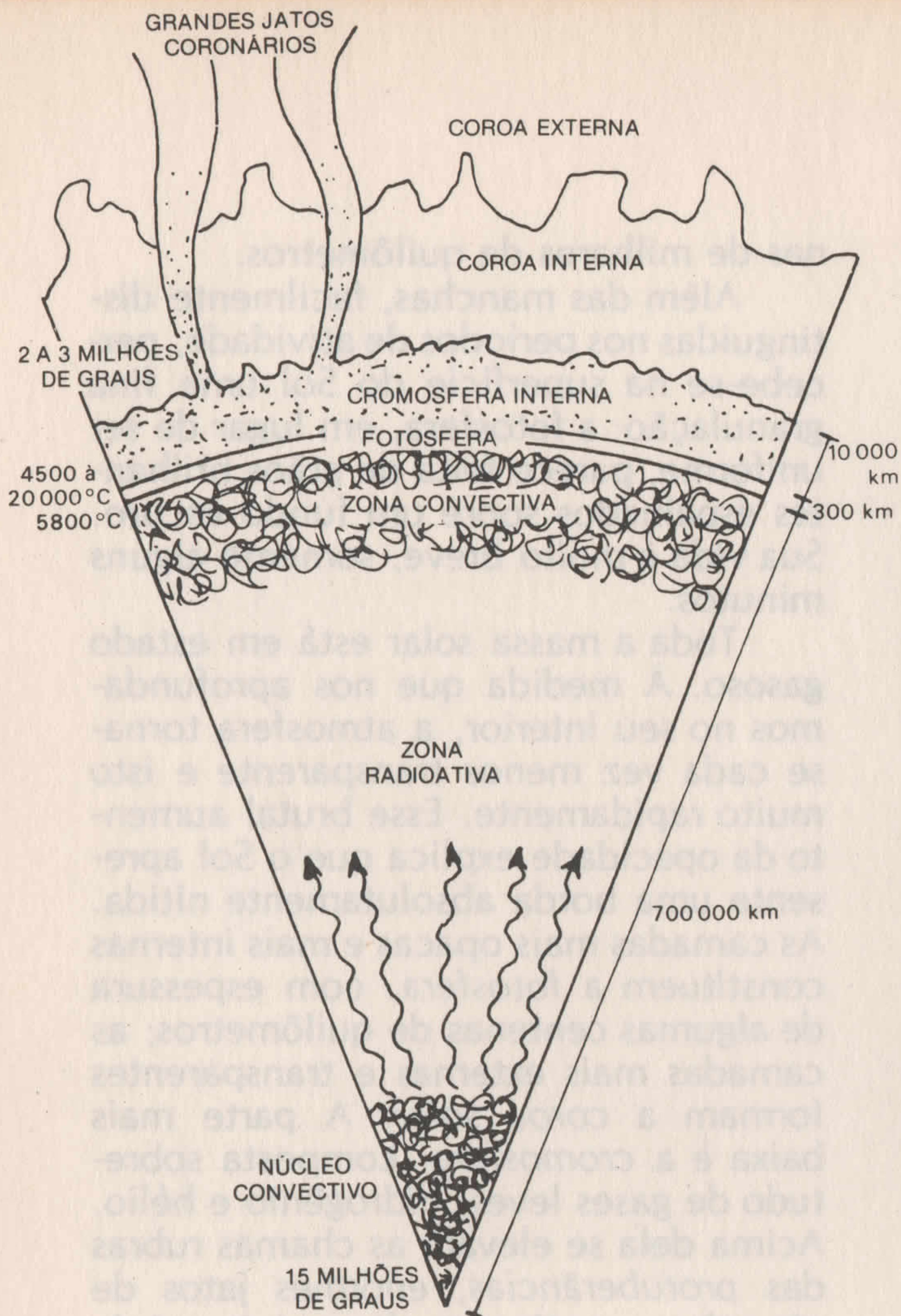



FIG. 44 — ESTRUTURA INTERNA DO SOL.

As radiações do Sol podem ser analisadas através de um prisma que permite assim fotografar o espectro solar. (Fig. 45) O prisma separa as radiações de diferentes comprimentos de ondas emitidas por uma fonte luminosa: para isso ilumina-se uma fenda estreita por meio da fonte a estudar; uma lente, diante da qual é colocado o prisma, dá tantas imagens da fenda quantos são os diferentes comprimentos de ondas diferentes na luz que ilumina a fenda: essa série de imagens monocromáticas emitidas por uma substância constitui o espectro da luz analisada. Trata-se de um espectro de emissão.

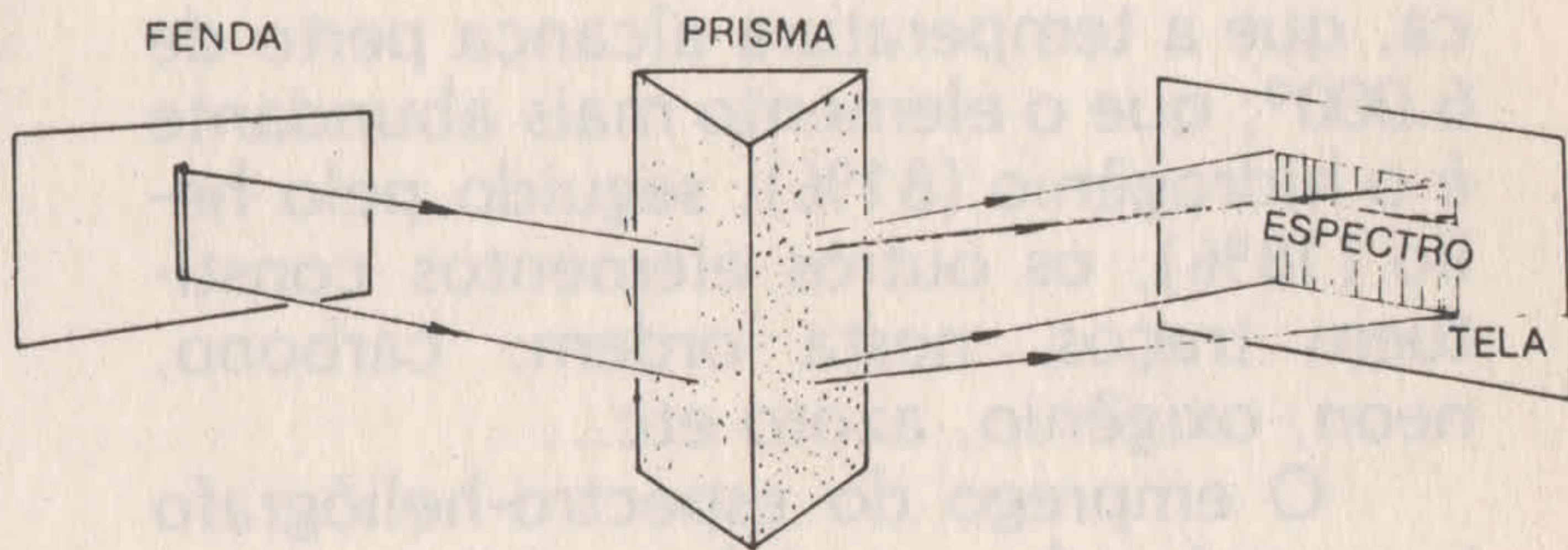



FIG. 45 — PRINCÍPIO DA ESPECTROSCOPIA.

Em contrapartida, o espectro de absorção é constituído pelas radiações monocromáticas que uma substância é capaz de absorver. Nesse caso, o espectro apresenta raias escuras. Analisando a luz proveniente da fotosfera, descobre-se que o espectro contínuo solar é sulcado por grande número de raias escuras, as raias de Fraunhofer, algumas muito finas, outras mais espessas e formando faixas. A intensidade das cores nos informa sobre a temperatura, do mesmo modo que a posição das raias permite estabelecer a composição química, a natureza e o estado físico dos componentes do Sol.

Sabe-se que a pressão média na fotosfera é de um décimo da atmosférica, que a temperatura alcança perto de 6.000°; que o elemento mais abundante é o hidrogênio (81%), seguido pelo hélio (18%); os outros elementos constituem traços, nesta ordem: carbono, neon, oxigênio, azoto etc...

O emprego do espectro-heliógrafo (espectrógrafo especial que fotografa os detalhes da superfície solar utilizando

um raio de luz monocromática) pôde confirmar e completar os estudos sobre a composição da atmosfera solar e sobre a natureza das protuberâncias. O nível mais baixo da atmosfera é aquele onde se acham as manchas e a granulação. Acima, encontra-se a camada rica em cálcio ionizado. Mais alto, pode-se fotografar o nível superior da cromosfera (cerca de 4.000 a 5.000 quilômetros). Finalmente, observam-se além as massas luminosas de hidrogênio emitidas pelas manchas. O espectro das protuberâncias apresenta as mesmas raias que a cromosfera; o que indica uma composição idêntica.

O espectro-heliógrafo revelou um fenômeno grandioso: *as erupções cromosféricas.*

Um ponto brilhante aparece às vezes nas regiões faculares que circundam as manchas de um centro de atividade. Sua freqüência é proporcional à intensidade dos campos magnéticos. Essas erupções emitem diferentes tipos de radiações luminosas e ultravioletas, raios X, ondas de rádio, bem como íons,

eléctrons e raios cósmicos a grande velocidade. Quando essas partículas encontram o campo magnético terrestre, elas podem penetrar pelos pólos e produzem então esses magníficos fenômenos luminosos que são as auroras polares, ou, menos agradavelmente, perturbam as emissões de rádio. Estão igualmente na origem de tempestades magnéticas.

A falsa imobilidade das estrelas

Em todos os tempos, o homem se emocionou com a contemplação do céu estrelado. O aspecto que apresenta o céu varia segundo as horas, as estações. Mas essa mudança é apenas aparente: as estrelas ocupam um lugar fixo, umas em relação às outras, na esfera celeste.

A fixidez das estrelas era conhecida de nossos antepassados bem como seus caracteres específicos.

A ciência moderna mostrou a seguir que essa fixidez não era absoluta

mas que, na escala da vida humana, e mesmo na da história, as estrelas podem ser consideradas como "fixas". Basta pensar que a estrela mais próxima, a Alfa do Centauro, está a cerca de 270.000 vezes a distância Terra-Sol. Somente umas poucas estrelas estão bastante próximas de nós para que possamos avaliar sua distância por métodos diretos.

Recorre-se geralmente ao ano-luz, espaço percorrido pela luz num ano à velocidade de 300.000 quilômetros por segundo.

A estrela mais próxima está a 4,3 anos-luz e a mais brilhante, Sirius, a 8,5! Assim a luz que nos chega hoje provém de astros que talvez não existem mais. Ela "partiu" há milhares de anos.

Como classificar 100 bilhões de estrelas

Para se situarem entre todas as configurações estelares, os Antigos as

tinham classificado em constelações. Essas constelações sofreram diversos remanejamentos segundo os lugares e as épocas;hoje, contamos 88 delas. Entre essas constelações, as 12 que orlam a eclíptica são chamadas constelações do zodíaco. Em seu movimento aparente em torno da Terra, do Sol e da Lua, os planetas se encontram sucessivamente nessas constelações. O conhecimento das constelações e das estrelas permite descobrir o aparecimento de um cometa ou de uma nova estrela. É útil saber também o nome das estrelas mais brilhantes. Os astrônomos acostumaramse a designá-las pelas letras do alfabeto grego ou por um número baseado no seu brilho. Assim *Alfa* é a mais brilhante, depois *Beta, Gama, Delta, Épsilon,* etc. Algumas conservaram seu nome grego, latino ou árabe.

O único elo entre nós e as estrelas é a luz que elas nos enviam. Sua análise nos ensina a respeito da estrutura e das características de cada uma. O espectro solar, em princípio, é contínuo e sulcado de raias escuras. Realmente, as

estrelas são formadas por um amontoado de gases incandescentes e de temperaturas muito altas e as raias nos indicam que elementos químicos as compõem e em que proporções.

Às vezes, raias brilhantes se superpõem: elas dependem de um envoltório gasoso externo muito rarefeito, semelhante à coroa solar.

A composição química é mais ou menos a mesma para todas as estrelas. As variações se devem essencialmente às diferenças de temperatura e densidade.

Calcula-se a temperatura da camada externa de uma estrela a partir da porcentagem de luz que ela emite no vermelho e no violeta do espectro. Quanto mais elevada a temperatura, mais a cor das estrela se desloca do vermelho para o branco. A interpretação do espectro solar permitiu classificar as estrelas: das mais quentes (40.000°C), azuis, às brancas (15.000°C), passando pelas amarelas, como o Sol, (6.000°C) e as vermelhas (5.000 a 2.000°C).

Classificam-se também as estrelas

em função de seus raios: as supergigantes, as gigantes e as anãs.

A diversidade de seu brilho, isto é, de seu grau de luminosidade, é igualmente um meio para distingui-las. As estrelas de primeira grandeza são as mais luminosas; a seguir vêm as de segunda grandeza, um pouco menos luminosas, etc. Fala-se atualmente na *magnitude* das estrelas. Segundo a escala das magnitudes de Pogson, cada classe de grandeza representa uma luminosidade de cujo coeficiente é inferior em 2,5 àquela que a precede.

Assim as estrelas de sexta grandeza, ou de magnitude seis, são 100 vezes mais fracas que aquelas de primeira grandeza, ou de magnitude um. A magnitude do Sol é —26,5; a da estrela mais fraca que nossos instrumentos permitem observar: +23,5.

O número de estrelas aumenta progressivamente com a magnitude. Contam-se perto de 20 estrelas de primeira grandeza, 60 de segunda grandeza, 170 de terceira, 400 de quarta, cerca de 1.000 de quinta grandeza e 4.000 de

sexta. Nossa galáxia compreenderia 100 bilhões de estrelas.

As variáveis

Certas estrelas têm um brilho muito forte (centenas de vezes mais elevado que o do Sol) que varia periodicamente com maior ou menor regularidade. São as mais interessantes do ponto de vista físico.

Na maioria dos casos, as alterações de brilho são acompanhadas por variações das condições físicas do raio, da cor e do espectro.

O intervalo entre dois máximos ou dois mínimos de intensidade sucessivos varia de algumas horas a centenas de dias.

A primeira variável foi descoberta em 1536 por David Fabricius: ela pertence à constelação da Baleia (Cetus), por isso chamaram-na de *Mira Ceti*, a maravilhosa estrela da Baleia. (Fig. 46)

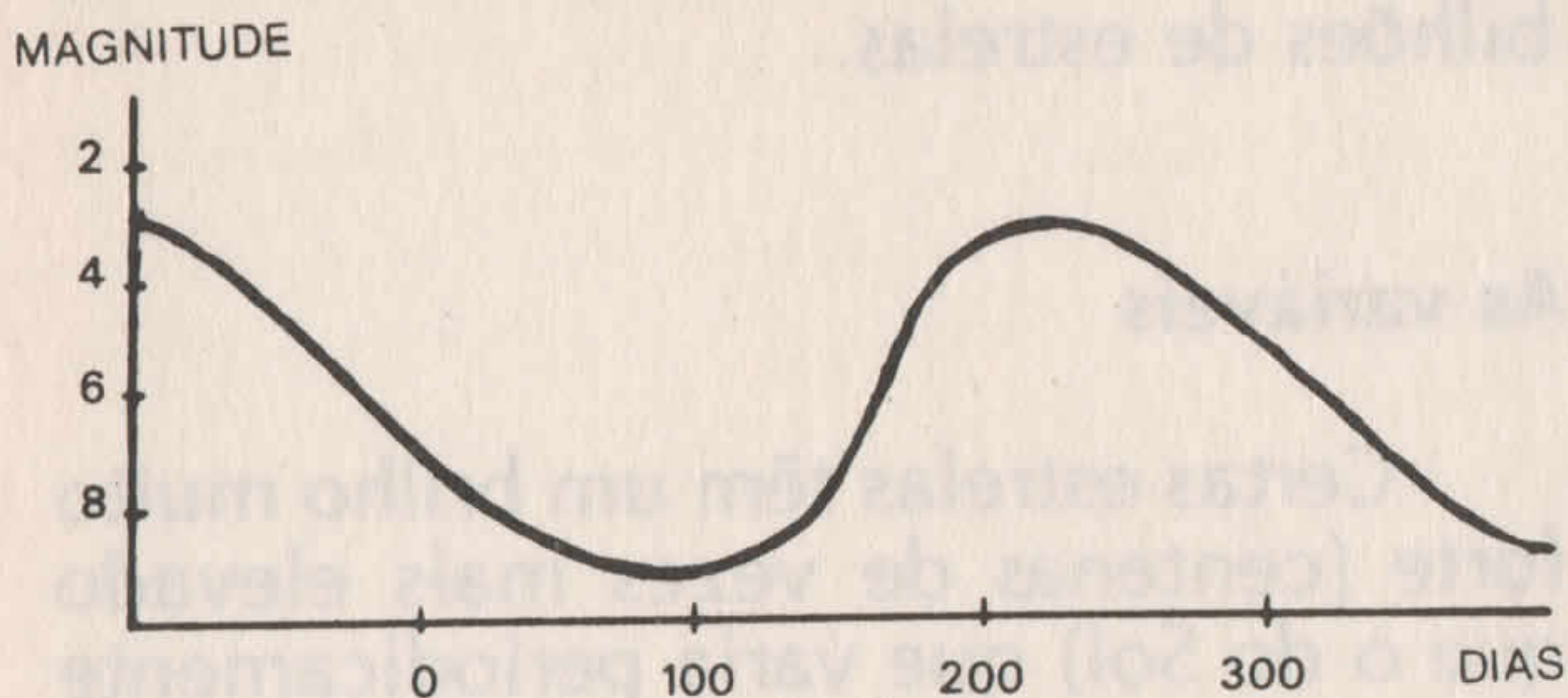
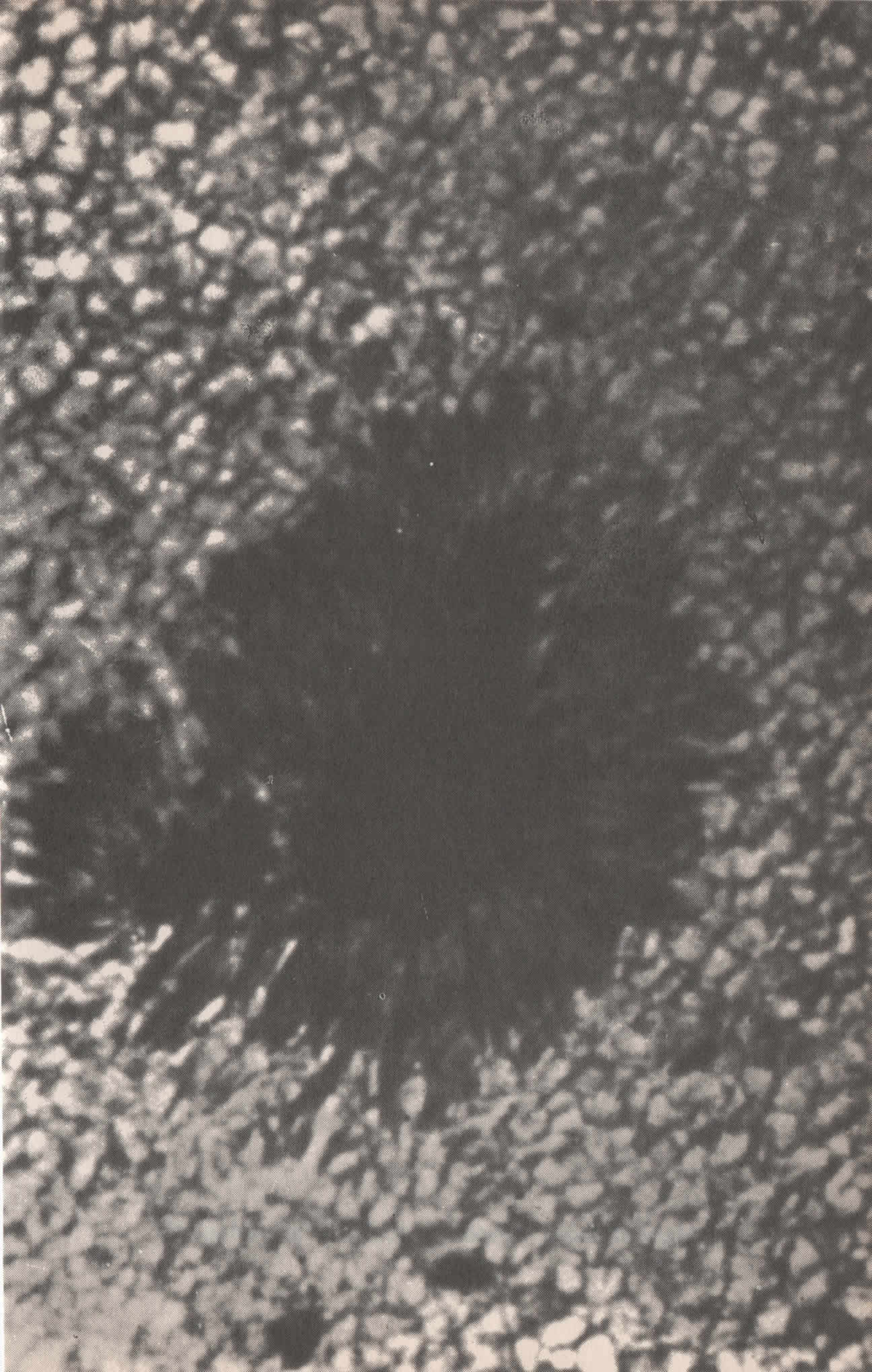



FIG. 46 — CURVA DE LUZ DE MIRA CETI.

Estrelas pulsantes de período curto ou Cefeidas

Seu período é constante e a curva de seu brilho regular. Freqüentes nos amontoados globulares, as Cefeidas, de período muito curto, são também chamadas *RR Lyrae*, de nome da variável mais importante do grupo.

As *Cefeidas clássicas,* de período mais longo (um a 150 dias) derivam seu nome da mais típica entre elas, δ Cefeus. (Fig. 47)

Elas se concentram na Via-Láctea e sua luminosidade é bastante alta. As RR Lyrae, ao contrário, estão espalhadas

Mancha solar, tendo em torno a "granulação".

MAGNITUDE

4,0

4,4

4,8

0 5,366 DIAS

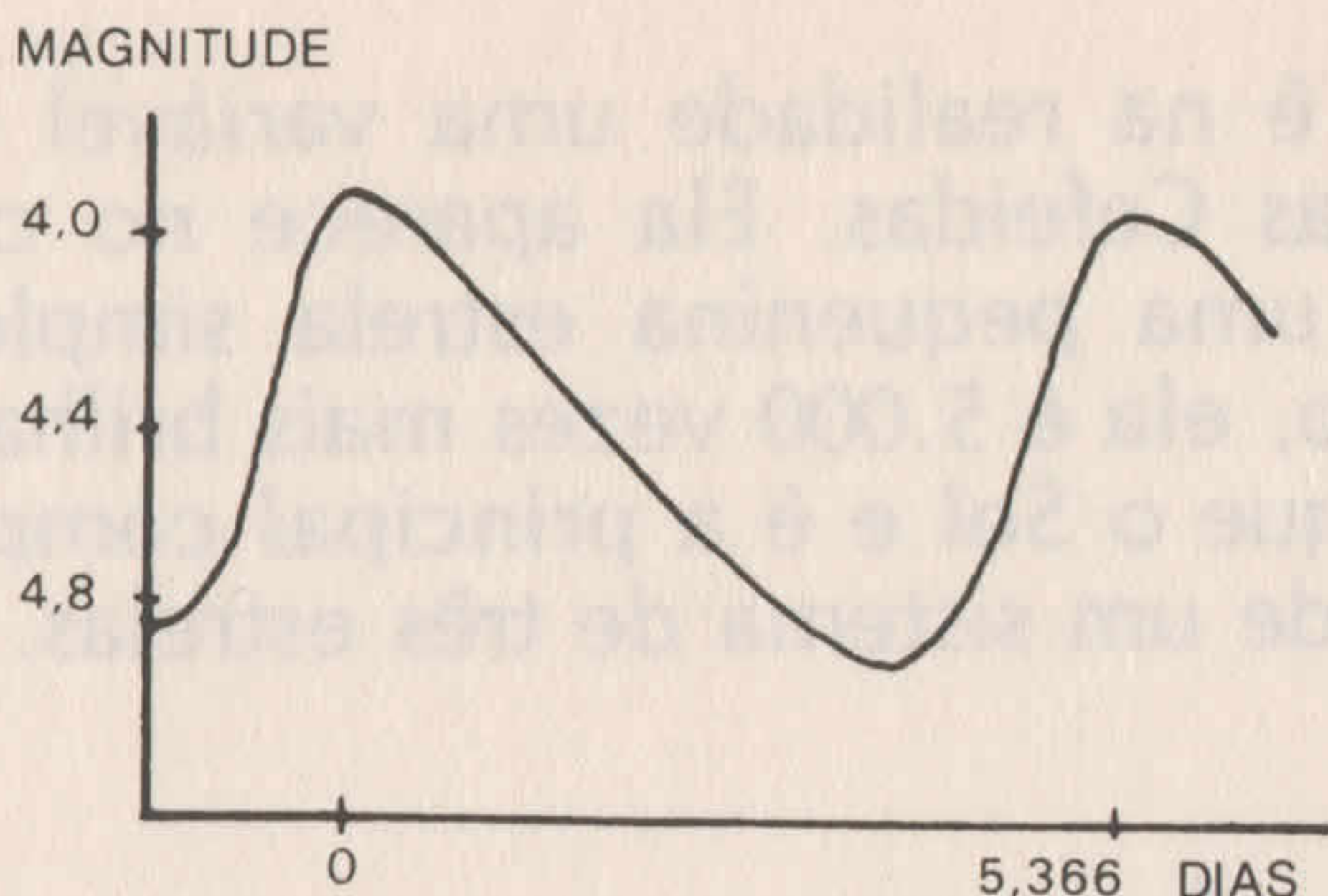



FIG. 47 — CURVA DE LUZ DE δ CEFEUS.

por todo o céu.

A identificação das RR Lyrae com as Cefeidas é um erro que causou bom número de problemas aos astrônomos. De fato, se essas estrelas são todas estrelas pulsantes e suas curvas de luz se assemelham, são, não obstante, fundamentalmente diferentes. As RR Lyrae são estrelas velhas, pobres de elementos pesados, enquanto que as Cefeidas são estrelas jovens, formadas a partir de um meio já enriquecido em elementos pesados.

A estrela Polar, cujo brilho foi por muito tempo considerado como cons-

tante, é na realidade uma variável do tipo das Cefeidas. Ela aparece no céu como uma pequenina estrela simples. De fato, ela é 5.000 vezes mais brilhante do que o Sol e é a principal componente de um sistema de três estrelas.

As estranhas novas

Distinguimos uma outra classe de variáveis que se caracterizam por um súbito aumento de brilho e pela expulsão de matéria gasosa: são as novas. A primeira estudada por Tycho Brahe em 1572 apareceu de repente na constelação de Cassiopéia e seu brilho cresceu rapidamente, superando o de Vênus! Ela continuou visível mesmo de dia, durante algum tempo; depois tornou-se cada vez menos luminosa e desapareceu no fim de 16 meses. Na realidade não se tratava de uma nova mas de uma supernova! Hsi-Tse-Tung afirma que, entre o ano 532 a.C. e 1690, 90 novas teriam sido observadas na China (das quais 11 supernovas). Esses dados não puderam

ser verificados. Muitas dessas novas eram talvez cometas!

Igualmente célebre é a *Nova Ophiuchi* aparecida em 1604, descrita por Galileu como um fenômeno excepcional e estudada por Kepler. Ela permaneceu brilhante durante algumas semanas e se extinguiu definitivamente dois anos mais tarde.

Conhecem-se atualmente perto de 170 novas em nosso universo e mais de 200 foram vistas em outras galáxias, notadamente em Andrômeda. Em 1897, foram observadas 28 na constelação de Sagitário.

Essas estrelas existem, é certo, antes e depois de seu aparecimento, mas elas são geralmente invisíveis pelos meios normais. As estatísticas estabeleceram que 20 novas aparecem todo ano, das quais somente duas serão visíveis a olho nu. Se elas se encontrassem à mesma distância que o Sol da Terra, brilhariam 60.000 vezes mais do que o Sol. O aumento de brilho pode ser muito repentino, de duração inferior a um dia. Uma

vez atingido seu máximo, a queda é um pouco mais lenta. (Fig. 48)

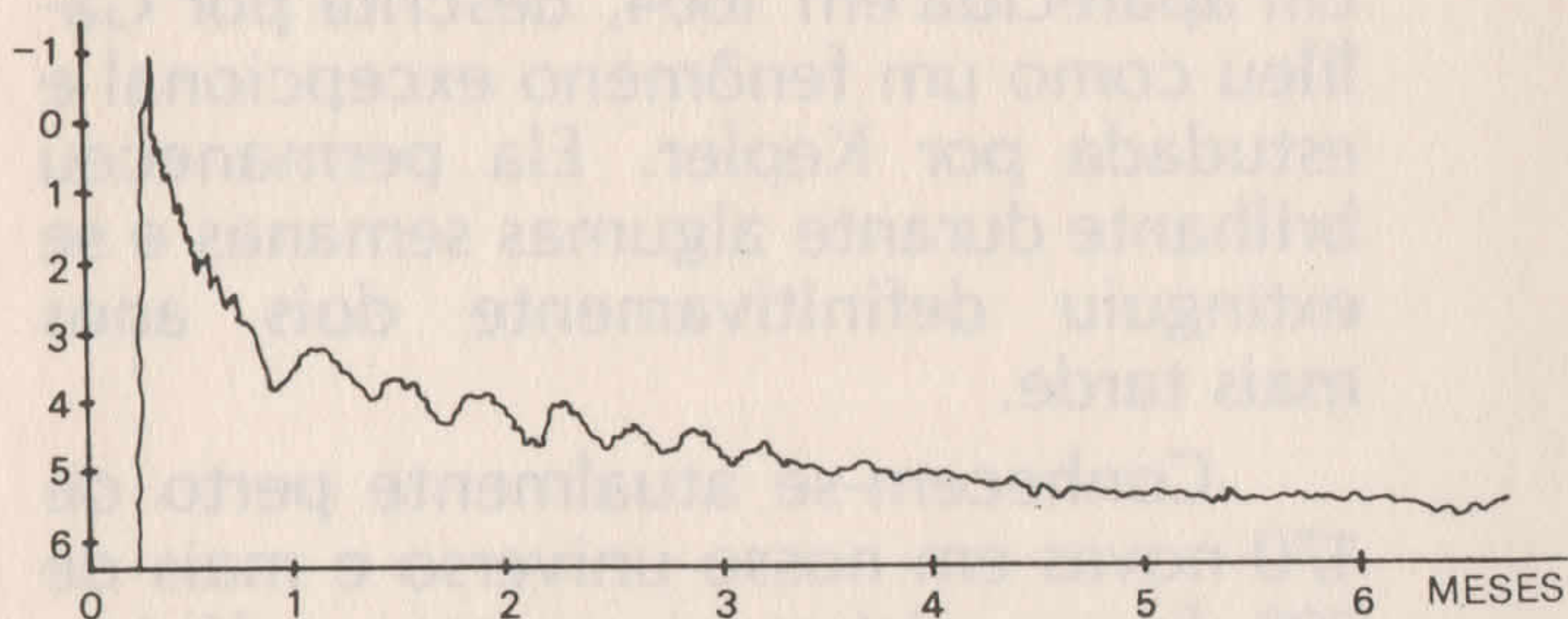



FIG. 48 — CURVA DE LUZ DA NOVA AQUILAE 1918.

Supõe-se que em certo momento a quantidade de energia emitida durante a unidade de tempo aumenta subitamente, provocando uma ruptura das camadas externas que são expelidas no espaço. As raias do espectro revelam uma expansão da fotosfera. O aumento de brilho seria pois devido a um aumento do raio estelar (200 a 300 vezes mais). Os gases expelidos se espalham no universo, enquanto que as camadas gasosas inferiores desempenham o

papel da fotosfera e o núcleo da estrela continua a diminuir. Durante a fase final, o espectro indica um aumento progressivo de temperatura. O núcleo é envolvido por leves nebulosidades formadas pelos gases expelidos: o astro toma assim o aspecto de uma "nebulosa planetária".

Esse fenômeno parece devido à queda de equilíbrio entre a força da gravidade dirigida para o centro e as pressões provocadas pela força de expansão dos gases e a pressão de radiação que tendem para o exterior. É provável que essa ruptura de equilíbrio seja causada por uma perturbação das reações nucleares no centro das estrelas. Esse ciclo de transformação das novas se relacionaria com um certo grupo de estrelas e poderia reproduzir-se para uma mesma estrela.

As supernovas

O fenômeno das supernovas é totalmente diferente do das novas, somen-

te os nomes é que se parecem. No caso de uma nova, as camadas exteriores são ejetadas e a estrela, a seguir, volta progressivamente a seu estado anterior. Para a supernova, trata-se de um fenômeno definitivo, a estrela explode literalmente, podendo seu brilho igualar-se sozinho ao de toda uma galáxia. A matéria que constituía a estrela se espalha no universo, ao passo que o centro da estrela que implodiu pode dar origem a uma anã branca ou a uma estrela de nêutros.

A *nebulosa de Caranguejo* é a mais típica desses objetos; ela é o resultado da supernova observada pelos chineses em 1054.

As estrelas duplas

Não é raro avistar no céu estrelas muito juntas uma da outra, ligadas pelas leis da gravitação. São chamadas estrelas duplas.

Ao telescópio, podem ser vistas em número cada vez maior. Mas sua observação é limitada àquelas que se acham

mais apartadas uma da outra. As estrelas muito "juntas" não podem ser separadas visualmente, mesmo com os meios mais poderosos.

Esse fenômeno é muito freqüente pois em média uma estrela em cada duas pertence a um sistema múltiplo (dupla, tripla, etc.).

As anãs brancas

A observação das estrelas duplas permitiu estabelecer que a massa de uma estrela aumenta em função de seu brilho absoluto. Essa lei foi confirmada pela massa do Sol, a única que se pôde calcular diretamente.

Existe porém um grupo de estrelas, as anãs brancas, que têm massa considerável em relação ao brilho. De fato, sua massa é igual à do Sol, ao mesmo tempo que elas são cerca de 10.000 vezes menos brilhantes que ele.

Os estudos do movimento não uniforme de Sirius mostram que esse fenômeno é devido a uma pequena estrela

10.000 mais fraca. As duas estrelas formam um sistema duplo. A massa da estrela Sirius B é 0,95 vezes a do Sol, mas seu raio é surpreendentemente pequeno: ele é da mesma ordem que o da Terra. Assim uma quantidade de matéria equivalente à do Sol está concentrada num volume 100.000 vezes menos considerável.

A densidade ali deve, pois, ser enorme; no centro da estrela, um centímetro cúbico de matéria pode pesar até 100 toneladas.

Nessas condições, a matéria é totalmente ionizada, não mais existem núcleos cercados de seu cortejo de eléctrons, e sim um gás de núcleos e eléctrons; a matéria nesse estado é dita *degenerada*.

Tais estrelas são astros agonizantes que continuarão a brilhar, cada vez mais fracamente, até que estejam completamente resfriados. (Fig. 49)

SOL

ANÃ BRANCA

ANÃ BRANCA

ESTRELA DE NÊUTRONS

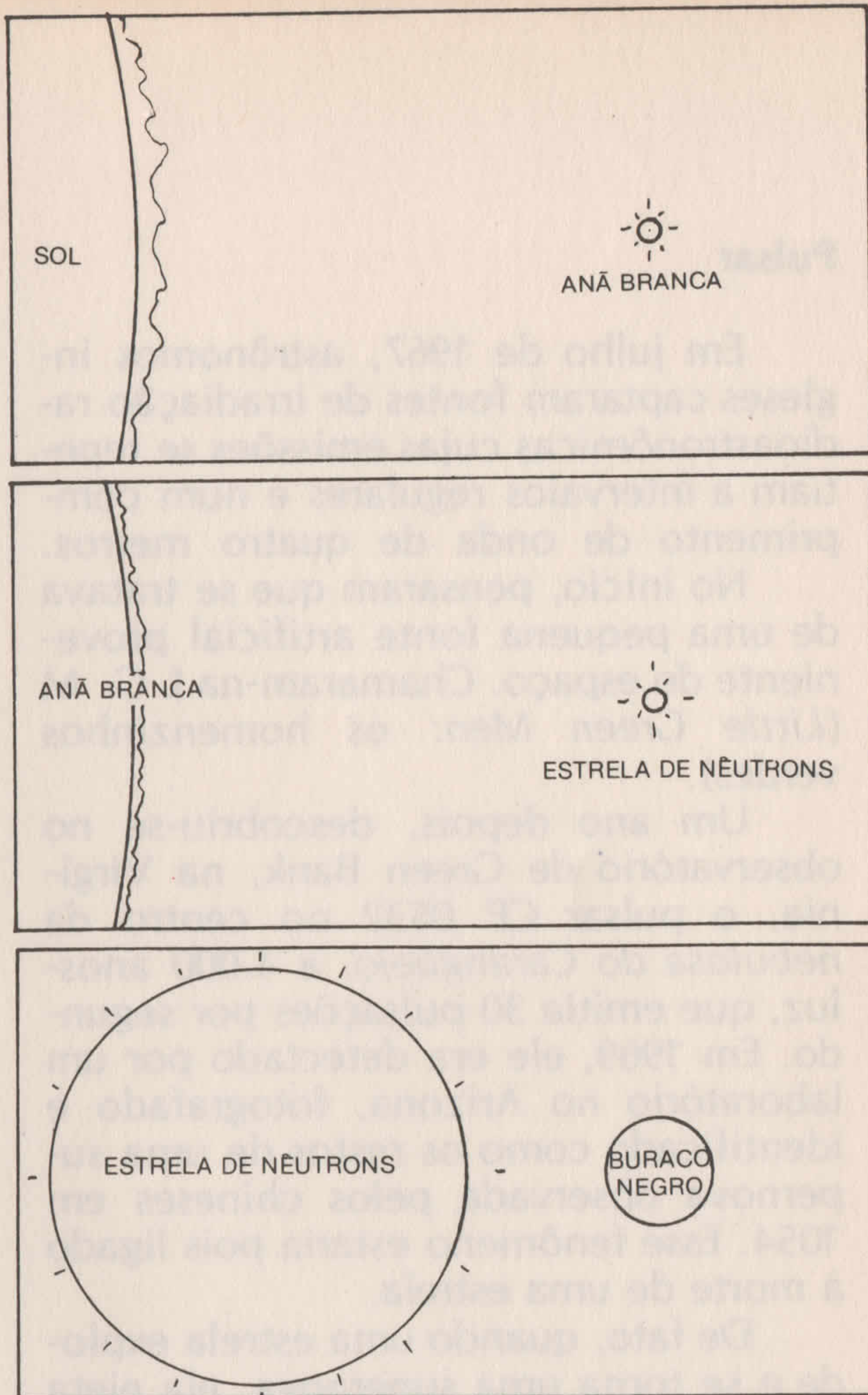
ESTRELA DE NÊUTRONS

BURACO NEGRO

FIG. 49 — COMPARAÇÃO ENTRE OS DIÂMETROS DO SOL, DE UMA ANÃ BRANCA, DE UMA ESTRELA DE NÊUTRONS E DE UM BURACO NEGRO.

Pulsar

Em julho de 1967, astrônomos ingleses captaram fontes de irradiação radioastronômicas cujas emissões se repetiam a intervalos regulares e num comprimento de onda de quatro metros.

No início, pensaram que se tratava de uma pequena fonte artificial proveniente do espaço. Chamaram-na L G. M (*Little Green Men:* os homenzinhos verdes).

Um ano depois, descobriu-se no observatório de Green Bank, na Virgínia, o pulsar CP 0532 no centro da *nebulosa do Caranguejo,* a 4.000 anos-luz, que emitia 30 pulsações por segundo. Em 1969, ele era detectado por um laboratório no Arizona, fotografado e identificado como os restos de uma supernova observada pelos chineses em 1054. Esse fenômeno estaria pois ligado à morte de uma estrela.

De fato, quando uma estrela explode e se torna uma supernova, ela ejeta grande quantidade de matéria que se afasta constituindo a seguir uma super-

nova. Mas o núcleo que subsiste da estrela pode precipitar-se sobre si mesmo formando uma *estrela de nêutrons* que, em certos casos, se tornaria um pulsar.

As emissões de um pulsar são muito regulares (calculou-se a possibilidade de um erro de um segundo a cada 30 milhões de anos).

Buracos negros

Para os astrônomos são de grande interesse... mesmo sendo invisíveis.

Os buracos negros não passam de estrelas cuja massa é enorme mas ocupa um volume relativamente pequeno. Possuem uma tal força de gravitação que não emitem nem luz, nem matéria, nem sinais de qualquer tipo. A densidade de um buraco negro de seis quilômetros de diâmetro é diversos bi lhões de vezes superior à do Sol.

Para estudar essas estrelas, é preciso ter presente a teoria de Einstein sobre a relatividade. A hipótese da existência

dos buracos negros foi aventada pela primeira vez por Oppenheimer e Hartland S. Snyder. Se pudéssemos lançar uma sonda num buraco negro, ela seria destruída em milésimos de segundo: primeiro sua matéria, depois suas moléculas, os átomos que a compõem, os núcleos dos átomos e finalmente as partículas elementares que constituem os núcleos.

Atualmente, essas teorias não passam de hipóteses que reclamam verificação. De qualquer modo, os buracos negros têm sua importância devido a sua influência sobre o movimento dos outros corpos celestes. É por essa razão que se procura hoje identificar buracos negros em certos sistemas de estrelas duplas e múltiplas. Voltaremos a este assunto mais adiante.

Os buracos negros representariam o derradeiro estágio da vida de estrelas muito maciças.

Aglomerados estelares e globulares

Certas estrelas se agrupam em pacotes ou aglomerados.

Elas formam os *aglomerados estelares abertos* ou *aglomerados galácticos*, pois foram descobertos na Via-Láctea. São conhecidos mais de 400 deles entre os quais os mais célebres são *Plêiades* e *Hiades,* todos dois na constelação de Touro.

Esses aglomerados, por via de regra, não contam mais de algumas centenas de estrelas que nasceram e se deslocam juntas no espaço. São objetos jovens pela escala astronômica.

Os *aglomerados globulares* são cachos de estrelas, constituídos de várias centenas de milhares de membros repartidos em forma esférica.

Um dos mais típicos é o aglomerado de Hércules. Seu estudo revelou a existência de numerosíssimas variáveis do tipo RR Lyrae, bem como de estrelas gigantes amarelas, alaranjadas e vermelhas.

Ao contrário dos precedentes, estes

aglomerados não se concentram na Via-Láctea e formam um anel periférico cujo centro está orientado para a constelação de Sagitário.

Os aglomerados globulares se situam a distâncias consideráveis, que os colocam fora de nossa galáxia, de que são satélites. (Fig. 50)

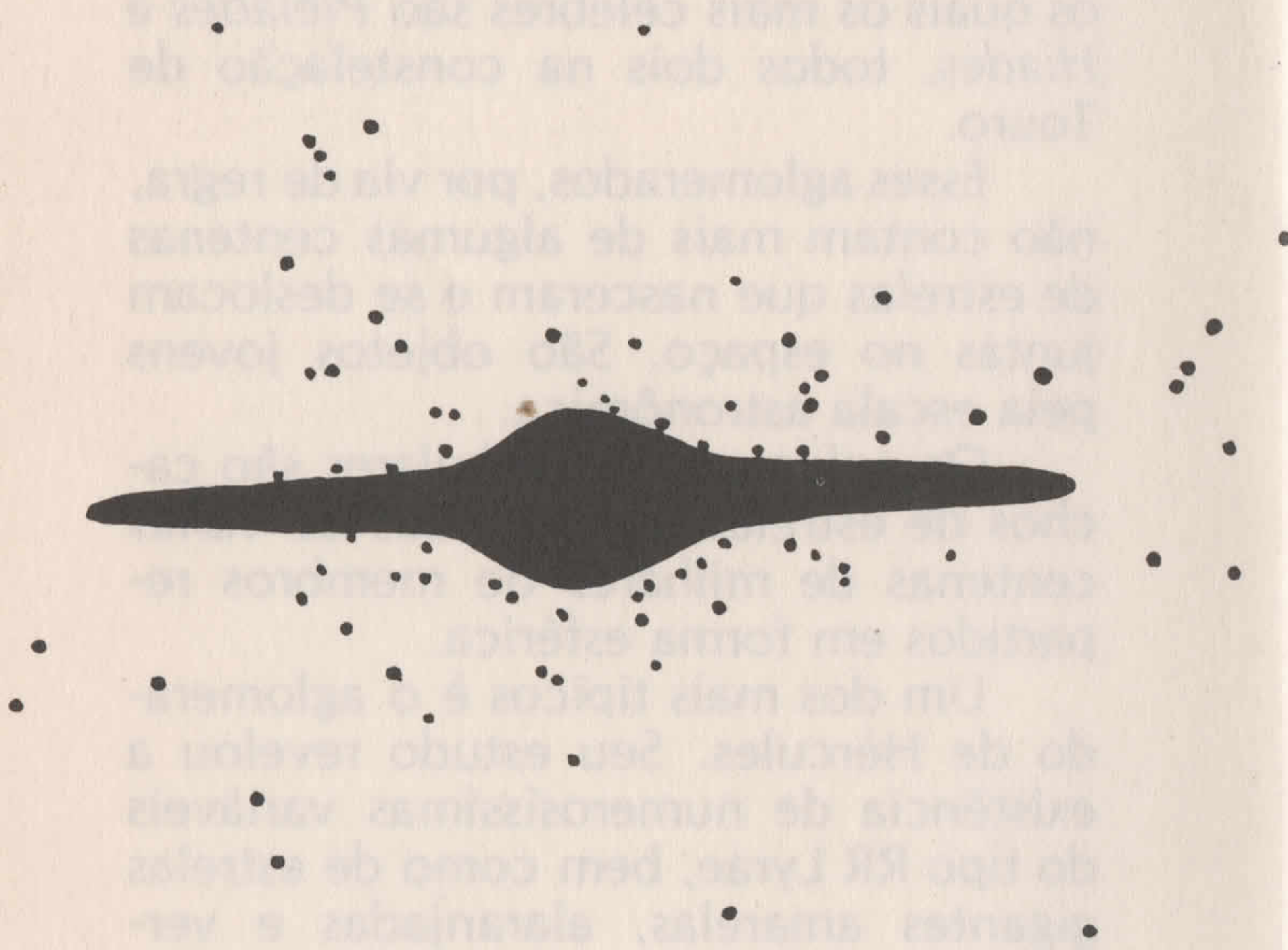



FIG. 50 — DISTRIBUIÇÃO DOS AGLOMERADOS GLOBULARES EM TORNO DA GALÁXIA.

Associações estelares

São aglomerados de estrelas do mesmo tipo espectral. Seu centro é muitas vezes constituído por um ou diversos aglomerados abertos. Seu diâmetro é bem superior ao de outros aglomerados abertos mas sua densidade é muito mais fraca.

Por isso essas associações são instáveis. Em 10 milhões de anos, elas se desintegrarão sob a influência da gravitação dos outros aglomerados e da rotação galáctica. Pensa-se geralmente que elas estão em expansão e chegou-se mesmo a determinar o começo desta que corresponde ao momento da criação dessas estrelas. Elas pertencem, portanto, às mais jovens formações da Galáxia.

A presença de nebulosidades ocupando superfícies imensas é uma prova da existência de matérias difusas no espaço interestelar.

Essas *nuvens de matéria interestelar* são compostas basicamente de hidrogênio, de hélio e outros elementos

em proporções ínfimas. Aos gases se acrescentam algumas partículas sólidas de um diâmetro de 0,1 a 1 μ formadas por síntese de moléculas de gás.

As nebulosas difusas

São muito numerosas e de aspecto muito diferente. Algumas emitem uma luz fraca demais para serem percebidas. A *nebulosa de Orion,* no centro da qual brilha a *Delta Orionis,* a mais conhecida, é visível a olho nu.

De fato, a matéria interestelar não é luminosa em si mesma, mas na proximidade de uma estrela de temperatura elevada ela pode absorver as radiações ultravioletas desta. Essas radiações excitam os átomos de gás muito ionizados. E a nebulosa emite então intensas radiações verdes. São as *nebulosas de emissão.*

Por outro lado, as nebulosas associadas a estrelas refletem a luz da estrela vizinha mais brilhante: são as *nebulosas de reflexão.*

À medida que aumenta a distância entre a estrela e as nebulosas, estas se vão tornando mais difíceis de observar.

Se não houver estrela na vizinhança da nebulosa, esta adquire então o aspecto de uma nuvem negra que esconde os astros situados atrás: é uma *nebulosa obscura*.

Em geral, as nebulosas são vastas demais para serem inteiramente iluminadas pelas estrelas vizinhas. Ao redor das regiões de emissão vão estender-se regiões obscuras e observa-se com freqüência a associação de matérias brilhantes e obscuras, como no caso da bela *nebulosa trífide* da constelação de Sagitário.

A galáxia

Nossa galáxia, sistema estelar que compreende uma multidão de estrelas, entre elas o Sol, é um enorme disco achatado de 100.000 anos-luz de diâmetro. Esse disco apresenta no centro

uma dilatação de perto de 20.000 anos-luz de diâmetro. Desse núcleo partem braços em forma de espirais e o Sol se acha na borda de um deles, a 30.000 anos-luz do centro. (Fig. 51)

20 000 al
1500 al
SOL
30 000 al
100 000 al

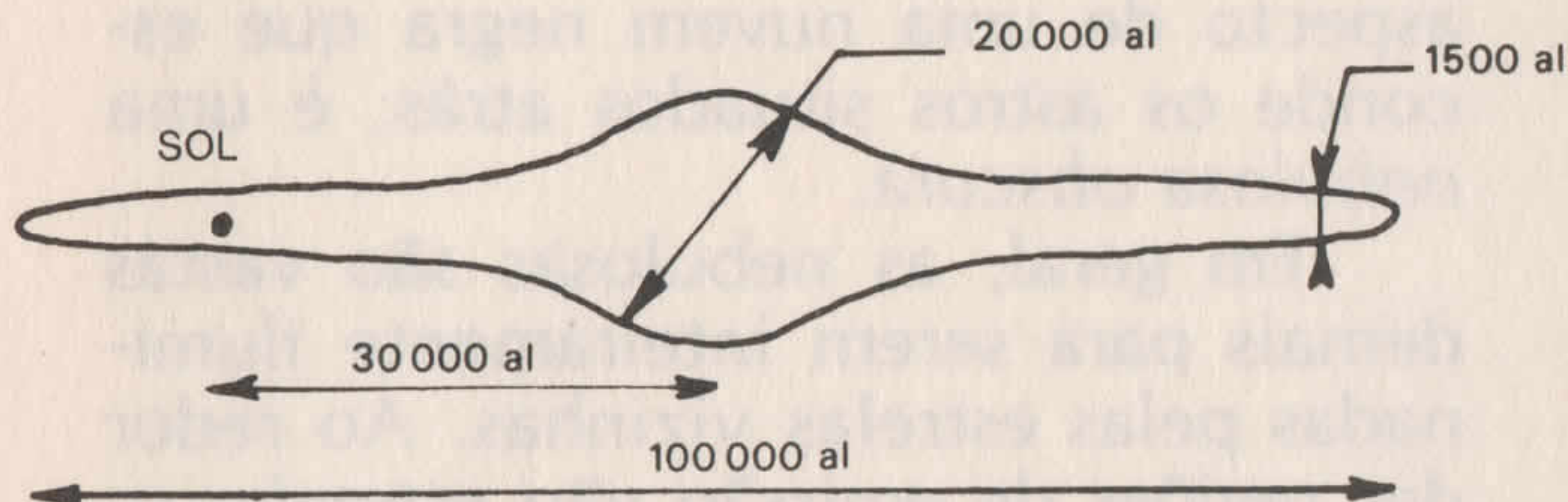
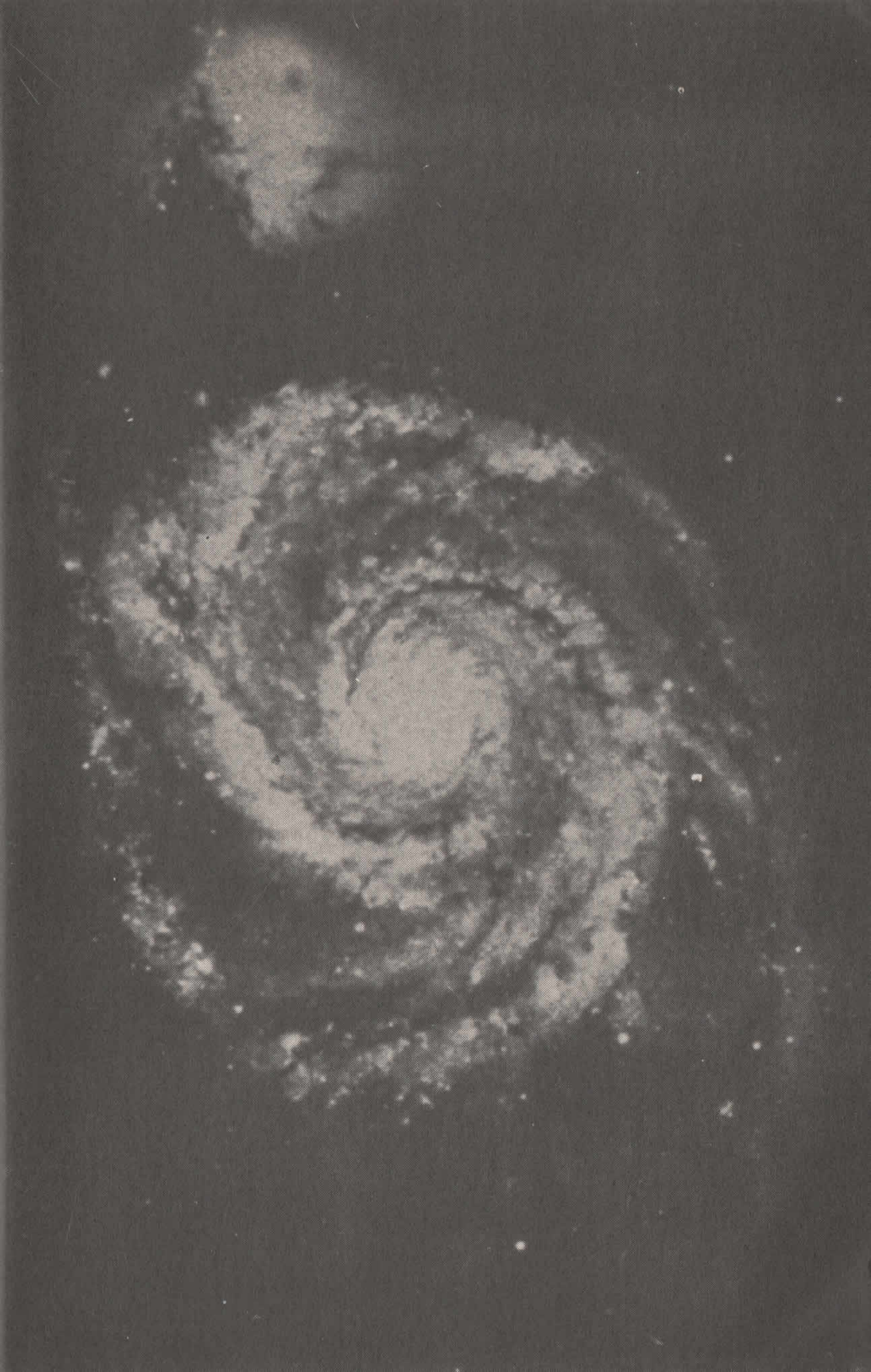



FIG. 51 — ESQUEMA DA GALÁXIA.

A galáxia se manifesta a nossos olhos sob a forma da Via-Láctea, que materializa o plano do disco e que aparece como tal devido ao acúmulo de estrelas colocadas umas atrás das outras.

O nome de Via-Láctea foi dado pelos Antigos porque durante as noites claras ela aparecia como uma faixa branca. Na realidade, essa "fita" é constituída por três braços distintos da espiral.

A galáxia dupla M 51, na constelação dos Cães de Caça.

O *braço de Sagitário* fica entre o Sol e a região central, a cerca de 2.000 parsecs do Sol (1 parsec = 3,26 anos-luz).

O *braço de Orion* compreende as estrelas do Cisne e da Carena.

O *braço de Perseu* fica a 2.000 parsecs do Sol, o qual se situa, ele próprio, na zona mais interna do braço de Orion, ao passo que as estrelas mais luminosas se acham no bordo externo.

A galáxia gira a uma velocidade de 270 quilômetros por segundo aproximadamente e pode-se imaginá-la como um corpo gasoso no qual a parte condensada do interior gira mais rapidamente que as partes externas ("rotação diferencial da galáxia"). De fato podemos distinguir nela sistemas de vários tipos: o quase esférico e lento dos aglomerados globulares externos, o achatado e rápido do disco onde se amontoam as estrelas mais jovens e a matéria interestelar, e ainda outros sistemas mais ou menos acaçapados contendo estrelas de várias idades.

Pode-se dizer que quanto menos

acaçapado é o sistema, mais numerosas são as estrelas de formação antiga.

De observações efetuadas em Andrômeda e mencionadas mais adiante, pode-se deduzir que em nossa galáxia o núcleo central contém somente estrelas vermelhas que já esgotaram uma parte de seu hidrogênio nuclear; estas ocupam também os aglomerados nucleares; nos braços, ao contrário, estão presentes as estrelas claras e a matéria interestelar ausente do núcleo.

O conhecimento de nossa galáxia aumentou quando se descobriu que ela emite um espectro contínuo de ondas de rádio que se estende ao longo de toda a Via-Láctea, porém mais intenso na direção de Sagitário.

Nebulosas extragaláticas ou galáxias exteriores

As galáxias exteriores são aglomerados numerosos de estrelas, apresentando múltiplas analogias com a nossa.

Seu estudo é muito difícil dado o

seu distanciamento; 95% dessas galáxias, regulares e simétricas em relação a um núcleo central, apresesentam uma grande variedade de formas espirais, esferoidais, elipsoidais. Entre as mais conhecidas, citemos as duas Nuvens de Magellan (a Pequena e a Grande), tão próximas de nós que são consideradas como nossos satélites.

As nuvens de Magellan

São duas galáxias visíveis a olho nu no hemisfério austral. Os árabes as haviam observado no século X. Depois Magellan (Fernando de Magalhães) e seus navegadores as redescobriram. Foram então batizadas de "Nuvens do Cabo da Boa Esperança" ou *Nubecola Mayor* e *Nubecola Minor.* No século XIX, o astrônomo Leavitt, notando a presença de diferentes tipos de Cefeidas e estudando a relação entre o período e a luminosidade dessas variáveis, conseguiu medir sua distância. (Fig. 52) As nuvens de Magellan estão a cerca de

MAGNITUDE ABSOLUTA

-4
-3
-2
-1

0 5 10 15 20 25

PERÍODO EM DIAS

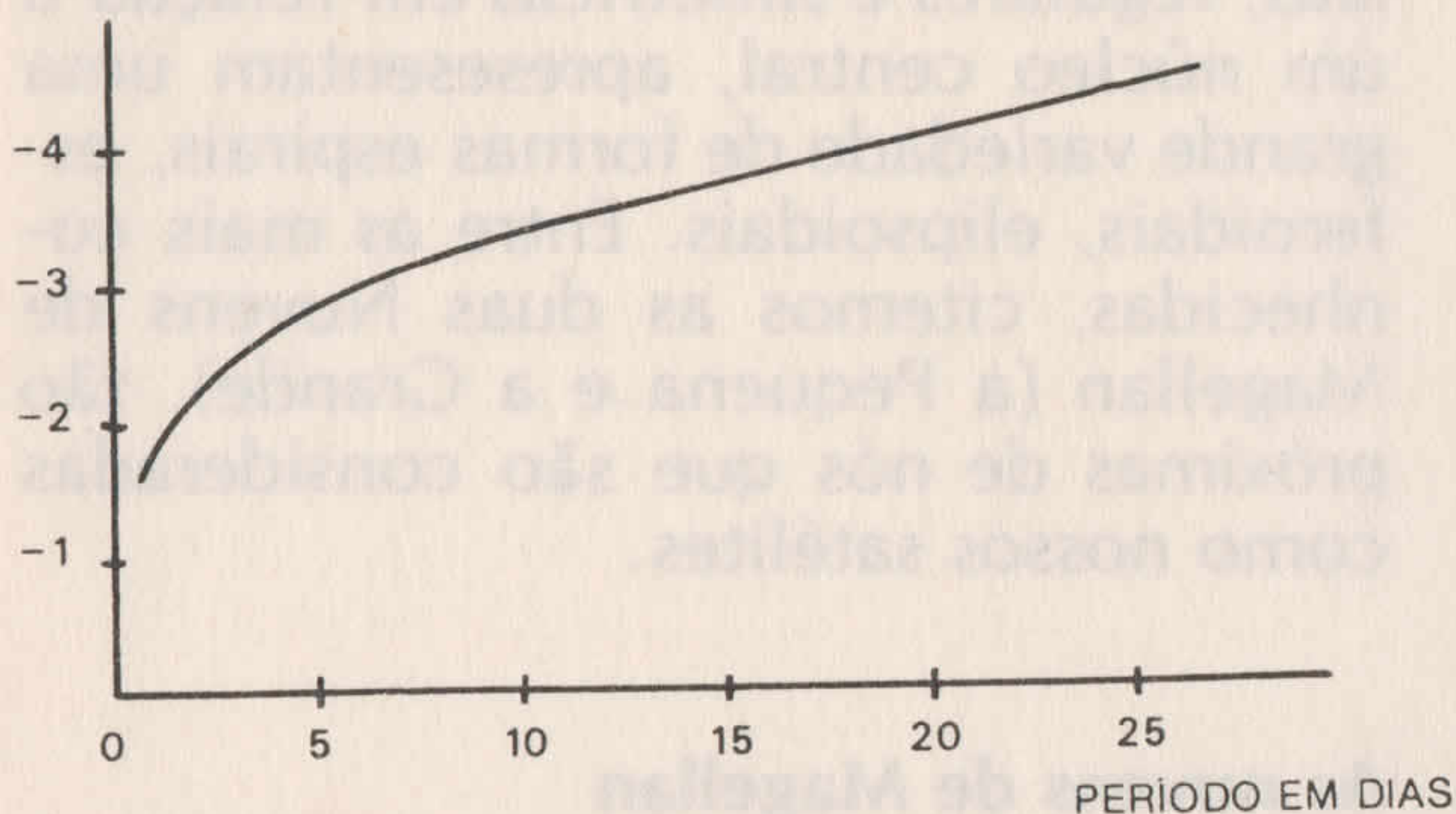



FIG. 52 — RELAÇÃO, PERÍODO-MAGNITUDE ABSOLUTA DAS CEFEIDAS.

150.000 anos-luz da Via-Láctea. As estrelas que as compõem são muito numerosas: centenas de milhões na *Pequena Nuvem,* sendo meio milhão de gigantes e dezenas de milhares de supergigantes.

As duas nuvens são ricas em matéria interestelar. As velhas "gigantes vermelhas" são ali pouco numerosas assim como as RR Lyrae. As duas nuvens seriam, pois, de formação relativamente recentes.

Andrômeda

A bela galáxia de Andrômeda é visível à vista desarmada na constelação de mesmo nome. Ela é conhecida há 1.000 anos.

De fato, por volta do ano 950, um astrônomo persa, Al-Sufi, havia notado a presença de uma nebulosidade na constelação de Andrômeda; mas apenas no século XX se pôde, graças ao telescópio, conhecer sua natureza.

Essa galáxia se estende por mais de 100 milhões de anos-luz e sua estrutura é parecida com a nossa. Ela está a cerca de dois milhões de anos-luz.

É uma enorme espiral com uma região central muito brilhante de onde se estendem dois braços simétricos. A matéria absorvente, perto das espiras, esconde parte do núcleo e dos braços. A região central é composta essencialmente de estrelas vermelhas gigantes.

Duas outras pequenas galáxias são visíveis, uma das quais quase se projetando sobre a principal, e a outra situando-se a 1° do centro.

Toda essa galáxia se aproxima da nossa a 100 quilômetros por segundo.

A galáxia do triângulo M 33

M 33 é uma outra galáxia relativamente próxima, distante somente 2,7 milhões de anos-luz da nossa. De tamanho inferior à galáxia, é visível porém a um simples binóculo. É uma galáxia espiral de núcleo muito pequeno, do qual partem braços bem desenvolvidos.

Seu nome "M 33" significa que se trata de 33.º objeto do catálogo do astrônomo Messier. Esse astrônomo francês não se interessava por esse tipo de astros; era um observador de cometas. Assim, para não confundir esses objetos "nebulosos" com cometas, fizera deles uma lista. É graças a essa lista que ele é mundialmente conhecido, não a seus trabalhos sobre os cometas!

Snickers

Recentemente descoberta, esta nebulosa anã, a mais próxima da Via-Láctea, está apenas a 55.000 anos-luz...

O astrônomo Christian Simonson III, da Universidade de Maryland, estudando a proveniência de certas nuvens de hidrogênio em movimento na nossa direção, observou que elas provinham de uma nova fonte, de uma nova galáxia oculta até então por uma cortina de estrelas e de poeira cósmica. Seu nome é tirado de... um tablete de chocolate. Pois Via-Láctea em inglês é Milky Way. *Snickers* e *Milky Way* são duas marcas de chocolate.

Sua dimensão é de cerca de um milésimo da Via-Láctea. Como Andrômeda, ela se aproxima de nossa galáxia descrevendo uma órbita semelhante à dos cometas em volta do Sol.

Sua distância exata e suas dimensões são, porém, incertas. Não se poderia calculá-las senão depois de ter situado as estrelas que a compõem.

Daqui a 80 milhões de anos, essa

nova galáxia estará muito perto da Via-Láctea, mas está excluída toda possibilidade de colisão, pois, pelo menos no momento, as duas caminham paralelamente.

A fuga das galáxias

A análise do espectro das galáxias mostra que elas "fogem" tanto mais depressa quanto mais se distanciam da Via-Láctea. É o fenômeno do *red-shift* ou deslocamento para o vermelho. De fato, as raias escuras do espectro de emissão são tanto mais deslocadas para o vermelho quanto mais distantes da galáxia. Esse deslocamento, segundo o efeito Doppler, traduz o afastamento: os espectros de todas as galáxias apresentam esse fenômeno e ele é ainda mais pronunciado para as galáxias distantes (4,6 bilhões de anos-luz) cuja velocidade de fuga é de 140.000 quilômetros por segundo. Essa fuga das galáxias faz parte de um processo de expansão do universo. Assinale-se, porém,

que desde o Congresso de Astronomia de 1976, essa hipótese da fuga das galáxias e de expansão do universo é contestada por certos estudiosos.

Quasars

Os quasars são fontes de emissões de rádio cuja origem não é ainda bem conhecida. Tiram seu nome da contração da expressão inglesa *quasi stellar radio sources*. O primeiro foi identificado em 1962 graças ao radiotelescópio de Parkes, na Austrália. E estabeleceu-se que ele correspondia a um objeto celeste de magnitude +13. A seguir foram localizados outros e precisaram-se suas características específicas. Trata-se de poderosas fontes de emissões de rádio da ordem de 10^{44} — 10^{45} ergs por segundo. Elas têm a aparência de simples objetos estelares, mas emitem uma energia luminosa que pode atingir 10^{46} ergs por segundo, ou seja, 100 a 1.000 vezes mais que a das galáxias gigantes.

As raias de emissão de quasars apresentam um acentuado deslocamento para o vermelho, que, se for interpretado no sentido da expansão do universo, leva a pensar que esses objetos são os mais longínquos do universo.

A natureza dos quasars é ainda desconhecida. Alguns pensam que não se trata de objetos distantes, mas sim de objetos próximos ejetados com grande velocidade. Para outros, que representam a maioria, não faltam hipóteses; citemos: a explosão de um núcleo de galáxia, efeitos de turbulência quando do nascimento de uma galáxia, o encontro de matéria e antimatéria, etc.

Conjuntos de galáxias

Os corpos celestes têm a tendência a se reunirem em subpopulações e sistemas, podendo certos conjuntos constituir por seu turno sistemas mais vastos.

Nossa galáxia e a nebulosa de Andrômeda, com seus satélites, pertencem a um conjunto composto de uma vinte-

na de galáxias chamado *grupo local*.

Nesse conjunto local são conhecidas, há muito tempo, três outras galáxias parecidas com os snickers. Trata-se de pequenas galáxias compostas de menos de um milhão de estrelas, muito visíveis.

A 40 milhões de anos-luz de nosso sistema, encontra-se outro conjunto importante: o da Virgem, que abarca vários milhares de galáxias e cujo diâmetro é da ordem de 10 milhões de anos-luz. Logo, é um conjunto muito denso.

O conjunto da Cabeleira de Berenice está a 300 milhões de anos-luz; o conjunto mais longínquo conhecido até agora é o que contém a fonte de rádio Bootes-A.

São geralmente conjuntos abertos, circulares ou elípticos, onde se encontram todo tipo de galáxias. A possibilidade de colisão é da ordem de um encontro a cada 3 bilhões de anos. Aliás, esse fenômeno não seria desastroso em vista das distâncias que separam as estrelas: uma galáxia "passaria" através da outra no momento da colisão.

Bibliografia

Contemplando o céu

F. Bocquet *Histoire de l'Astronomie*
C. Flammarion *Le Système du Monde et Copernic*
J. Jastrow *Des Astres, de la Vie et des Hommes*
C. Sagan *Cosmic Connection*

A terra, nosso planeta

F. Delobeau *L'Environnement de la Terre*
C. Pomerol *Stratigraphie et Paléogéographie*
H. Tazieff *Quand la Terre Tremble*
H. Tazieff *Les Volcans et la Dérive des Continents*

La Géophysique (La Pléiade)

Planetas, estrelas e galáxias

V. De Callataÿ *Atlas de la Lune*

J. Dufay *Les Comètes*
M. Dumont et G. Oudenot *Introduction à l'Astronomie*
C. Flammarion *L'Astronomie Populaire*
R. Guillemard *Comprendre l'Astronomie*
J. Herrmann *Atlas d'Astronomie*
F. Hoyle *Highlights in Astronomy*
R. Michard *Le Soleil*
P. Moore *Atlas de l'Univers*
J. C. Pecker *La Nouvelle Astronomie*

Ths Solar System (Scientific American)

Índice

As ilustrações
desta obra
vieram da
Edição Italiana
e foram fornecidas por
Richerche Iconografiche De Cesare.